

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
FAKULTA TEXTILNÍ

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Liberec 2012

Bc. Taťana Kryvenková

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**FAKULTA TEXTILNÍ**

**ELEKTROMECHANICKÉ VLASTNOSTI  
TEXTILNÍCH ÚTVARŮ SE ZVÝŠENOU  
ELEKTRICKOU VODIVOSTÍ**

**ELECTROMECHANICAL PROPERTIES OF  
TEXTILE UNITS WITH INCREASED  
ELECTRICAL CONDUCTIVITY**

**KHT - 148**

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Taťana Kryvenková**  
Osobní číslo: **T10000037**  
Studijní program: **N3108 Průmyslový management**  
Studijní obor: **Management jakosti**  
Název tématu: **Elektromechanické vlastnosti textilních útvarů se zvýšenou elektrickou vodivostí**  
Zadávající katedra: **Katedra hodnocení textilií**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Vypracujte literární rešerši na téma elektromechanické vlastnosti lineárních textilních útvarů se zvýšenou elektrickou vodivostí a jejich hodnocení.
2. Analyzujte vybrané hybridní příze obsahující ve své struktuře kovová vlákna.
3. Navrhněte a realizujte experimentální studii speciálních přízí se zvýšenou vodivostí: a) zjistěte závislost elektrických charakteristik speciálních přízí na jejich struktuře (obsah vodivé komponenty, jemnost, zákrut), b) studujte mechanické a elektromechanické vlastnosti výše uvedených přízí s ohledem na jejich uplatnění a mechanické namáhání v plošných textilních útvarech.
4. Získané výsledky vyhodnoťte, interpretněte a diskutujte vhodnost použití studovaných přízí pro konkrétní aplikace.
5. Navrhněte konkrétní funkční výrobek obsahující studované hybridní příze.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: 50 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. MORTON, W.E, HEARLE, J.W.S. Physical Properties Of Textile Fibres. London : Woodhead Publishing, 2008. ISBN 1845692209.
2. HARLIN, A., FERENETS, M. Intelligent textiles and clothing. London : Woodhead publishing, 2006. ISBN 1845690052.
3. TAO, X.M. Wearable electronics and photonics. Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2005. ISBN 1 85573 605 5.
4. WANG, X., CHUNG, D.D.L, Electromechanical behavior of carbon fiber. Carbon, Vol. 35, Iss. 5, 1997, p. 706-709 Xiaojun Wang, D.D.L. Chung
5. SCHWARZ, A., KAZANI, I., CUNY, L., et al. Electro-conductive and elastic hybrid yarns - The effects of stretching, cyclic straining and washing on their electro-conductive properties. Materials & Design, Vol. 32, Iss. 8-9, 2011, p. 4247-4256.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Veronika Šafářová

Katedra hodnocení textilií

Konzultant diplomové práce:

Ing. Miroslava Maršálková, Ph.D.

Katedra textilních materiálů

Datum zadání diplomové práce:

31. října 2011

Termín odevzdání diplomové práce:

9. května 2012



prof. RNDr. Aleš Linka, CSc.

děkan



Ing. Vladimír Bajzík, Ph.D.

vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2011

## P r o h l á š e n í

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum                      9. 5. 2012

Podpis                      .....

## **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala vedoucí své diplomové práce Ing. Veronice Šafářové za odborné vedení, ochotný a vstřícný přístup k mé práci, poskytnutí cenných rad i připomínek, za pomoc a veškerý čas, který mi věnovala. Také bych chtěla poděkovat mé rodině, která mi byla při psaní této práce velikou oporou, stejně jako při mém celém studiu.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zaměřuje na studium elektromechanických vlastností textilních útvarů se zvýšenou vodivostí. V teoretické části práce je pojednáno o textilních materiálech se zvýšenou elektrickou vodivostí, mezi které patří elektricky vodivá vlákna a elektricky vodivé textilie. Zmíněny jsou vlastnosti, výroba a popis kovových i pokovených vláken, vodivých kompozitních polymerních vláken, bikomponentních vláken, uhlíkových vláken a nanovláken i vláken z vodivých polymerů. V další části práce jsou popsány možnosti výroby textilií se zvýšenou elektrickou vodivostí. Dále jsou zmíněny elektrické vlastnosti textilií, délkových textilních útvarů, možnosti ovlivňování elektrické vodivosti materiálů a elektromechanické vlastnosti textilií. V praktické části byly studovány jak délkové, tak i plošné textilní útvary. Zvýšení elektrické vodivosti bylo docíleno zakomponováním staplového kovového vlákna do struktury příže. Byly pozorovány jejich elektrické, mechanické a elektromechanické vlastnosti. Výsledky elektrických, mechanických a elektromechanických vlastností délkových i plošných textilních útvarů byly vyhodnoceny a graficky interpretovány. Cílem práce je určit vhodnost použití studovaných přízí pro konkrétní aplikace a navrhnout konkrétní funkční výrobek obsahující studované hybridní příže.

## **Abstract**

This thesis focuses on the study of electromechanical properties of textile formations with increased electrical conductivity. The theoretical part deals with textile materials with enhanced electrical conductivity, which includes electrically conductive fibers and conductive textiles. Mentioned are properties, production and description of metallic and coated fibers, conductive polymer composite fibers, bicomponent fibers, carbon fibers and nanofibers and conductive polymers. The next part of the study describes the possibilities of production of textiles with enhanced electrical conductivity. Further, electrical properties of textiles, textile units of length, the possibility of influencing the electrical conductivity of materials and electromechanical properties of textiles are mentioned. In the practical part of the work there has been studied both linear and planar textile structures. The increase in electrical conductivity was achieved by incorporation of metal staple fibers into yarn structure.

Electrical, mechanical and electromechanical properties were studied. The results of electrical, mechanical and electromechanical properties of linear and planar textile units have been evaluated and graphically interpreted. The aim of the work is to determine the suitability of the studied yarns for specific applications, and propose specific functional product containing the studied hybrid yarn.



## **Klíčová slova – Keywords**

Elektrická vodivost – Electrical conductivity

Elektrický odpor – Electrical resistance

Hybridní příze – Hybrid yarns

Elektrické vlastnosti – Electrical properties

Elektromechanické vlastnosti – Electro-mechanical properties

Mechanické vlastnosti – Mechanical properties

Elektricky vodivá vlákna – Electrically conductive fibers

Kovová vlákna – Metal fibers (Metallic filament)

## Obsah

Úvod.....	14
1. Textilní materiály se zvýšenou elektrickou vodivostí.....	16
1.1 Elektricky vodivá vlákna.....	17
1.1.1 Kovová vlákna .....	18
1.1.1.1 Materiály .....	18
1.1.1.2 Výroba kovových vláken .....	19
1.1.1.3 Vlastnosti kovových vláken .....	19
1.1.2 Pokovená vlákna .....	20
1.1.2.1 Metody pokovování .....	20
1.1.2.2 Vlákna obsahující kov, oxidy kovů a soli kovů .....	20
1.1.3 Vodivá kompozitní polymerní vlákna .....	21
1.1.3.1 Polymery plněné uhlíkovými sazemí .....	22
1.1.3.2 Vlákna plněná uhlíkovými nanotubicemi .....	23
1.1.3.3 Vlákna plněná kovovými částicemi .....	24
1.1.3.4 Vlákna plněná nanočásticemi solí kovů .....	25
1.1.4 Bikomponentní vlákna .....	26
1.1.4.1 Definice bikomponentních vláken .....	26
1.1.4.2 Výroba bikomponentních vláken .....	27
1.1.5 Uhlíková vlákna a nanovlákna.....	27
1.1.5.1 Struktura a výroba uhlíkových vláken .....	28
1.1.5.2 Vlastnosti uhlíkových vláken .....	29
1.1.5.3 Uhlíková nanovlákna .....	29
1.1.6 Vlákna z vodivých polymerů .....	30
1.1.6.1 Vodivé polymery.....	30
1.2 Elektricky vodivé textilie .....	32
2. Elektrické vlastnosti textilií.....	34
2.1 Vlastnosti elektrotechnických materiálů .....	34
2.1.1 Pásový model pevných látek.....	35
2.1.2 Elektrický odpor $R$ .....	36
2.1.3 Elektrická vodivost $G$ .....	36
2.1.4 Specifický elektrický odpor $\rho$ .....	37
2.1.5 Měrná elektrická vodivost $\gamma$ .....	37
2.1.6 Součinitel elektrického odporu $\alpha$ .....	38
2.2 Elektrické vlastnosti délkových textilních útvarů .....	38
2.2.1 Délkový specifický odpor lineárních textilních útvarů $R_L$ .....	38
2.2.2 Hmotnostní specifický odpor lineárních textilních útvarů $R_S$ .....	39

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

---

2.2.3	Měření elektrického odporu.....	39
2.2.3.1	Uspořádání vzorků .....	40
2.3	Ovlivňování elektrické vodivosti materiálů .....	41
2.3.1	Vliv vlhkosti .....	41
2.3.1.1	Porovnání elektrických vlastností různých materiálů .....	42
2.3.2	Vliv nečistot .....	43
2.3.3	Vliv teploty .....	44
3.	Elektromechanické vlastnosti textilií .....	45
4.	Experimentální část .....	53
4.1	Použité materiály.....	53
4.1.1	Analýza délkových textilních útvarů .....	53
4.1.2	Analýza plošných textilních útvarů .....	56
4.2	Metodika měření a použité měřicí přístroje .....	57
4.2.1	Měřicí přístroje a metodika měření délkových textilních útvarů.....	57
4.2.2	Měřicí přístroje a metodika měření plošných textilních útvarů.....	62
4.3	Hodnocení vlastností délkových textilních útvarů .....	63
4.3.1	Hodnocení elektrických vlastností.....	63
4.3.2	Hodnocení mechanických vlastností .....	70
4.3.3	Hodnocení elektromechanických vlastností .....	72
4.4	Hodnocení vlastností plošných textilních útvarů .....	74
4.5	Aplikace studovaných přízí.....	75
4.6	Návrh funkčního výrobku .....	76
	Závěr .....	77
	Literatura.....	79
	Seznam příloh .....	82
	Příloha I.....	82
	Příloha II.....	83
	Příloha III .....	83
	Příloha IV .....	84
	Příloha V .....	85

## Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam zkratk	
MP4	multimediální přehrávač
atd.	a tak dále
např.	například
tab.	tabulka
obr.	obrázek
viz	lze vidět
tzv.	takzvaný
apod.	a podobně
resp.	respective
vs.	versus
popř.	popřípadě
tzn.	to znamená
CO	bavlna
WO	vlna
LI	len
SE	přírodní hedvábí
CA	konopí
PA6	polyamid 6
PA6.6	polyamid 6.6
PAN	polyakrylonitril
PES	polyester
PP	polypropylen
PPy	polypyrrol
PA	polyacetylen
PANI	polyanilin
PTh	polythiopen
PET	polyester
PU	polyuretan
POPs	polypropylen

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

CPC	conductive polymer composites = vodivé polymerní kompozity	
CB	carbon black = uhlíkové saze	
SWNT	single walled nanotube = jednovrstvé nanotrubičky	
MWNT	multiwalled nanotube = vícevrstvé nanotrubičky	
S/S	side-by-side = strana/strana	
C/S	core/sheath = jádro/plášť	
M/F	matrix/fibril = matrice/vlákno	
ICP	intrinsically conductive polymers = přirozeně vodivé polymery	
EVO	Evoprene	
Bekinox	obchodní název kovových staplových vláken	
eV	elektrovolt	
N	počet konců	
f (N)	funkce normálové síly	
mm	milimetr	
cm	centimetr	
m	metr	
kg	kilogram	
N	newton plošná hmotnost	
$\Delta R/R_0$	změna elektrického odporu a počáteční odpor	
IS	interval spolehlivosti	
Seznam symbolů		
A	plošná hmotnost	[g/m <sup>2</sup> ]
ln(ρ)	přirozený logaritmus specifického elektrického odporu	[Ωm]
R	elektrický odpor	[Ω]
d	průměr vlákna	[μm]
ρ	hustota (měrná hmotnost)	[kg/m <sup>3</sup> ]
σ	pevnost v tahu	[N/mm <sup>2</sup> ]
ρ	specifický elektrický odpor	[Ωm]
λ	teplená vodivost	[W/mK]
F	pevnost	[N]
E	modul pružnosti	[MPa]

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

$\varepsilon$	relativní prodloužení (deformace)	[%]
$\alpha$	koeficient teplotní roztažnosti	[1/K]
W	práce	[J]
G	elektrická vodivost	[S]
I	elektrický proud	[A]
U	elektrické napětí	[V]
l	délka	[m]
S	plocha	[m <sup>2</sup> ]
d	průměr	[m]
$\gamma$	měrná elektrická vodivost	[S/m]
R <sub>T</sub>	elektrický odpor při teplotě T	[Ω]
T	teplota	[°C]
R <sub>20</sub>	elektrický odpor při teplotě 20 °C	[Ω]
$\alpha$	součinitel elektrické rezistivity	[Ωm <sup>-2</sup> ]
R <sub>L</sub>	délkový specifický odpor	[Ω/m]
R <sub>S</sub>	hmotnostní specifický odpor	[Ωkg/m <sup>2</sup> ]
T	jemnost	[tex]
M	obsah vlhkosti	[%]
n	konstanta	[-]
K	konstanta	[-]
Log R <sub>S</sub>	logaritmus hmotnostního specifického odporu	[Ωkg/m <sup>2</sup> ]
Log M	logaritmus obsahu vlhkosti	[%]
n'	konstanta	[-]
K'	konstanta	[-]
K	citlivost	[-]
R <sub>v</sub>	elektrický odpor měřený ve směru osnovy	[Ω]
R <sub>h</sub>	elektrický odpor měřený ve směru útku	[Ω]
N <sub>p</sub>	dostava útku	počet nití na jednotku délky
N <sub>e</sub>	dostava osnovy	počet nití na jednotku délky
$\lambda$	elektrický odpor na jednotku délky	[Ω/m]

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

---

$C_v$	vazné vlny ve směru osnovy	
$C_h$	vazné vlny ve směru útku	
$R_c$	kontaktní odpor	[ $\Omega$ ]
$t$	teplota	[ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\varphi_1$	relativní vlhkost vzduchu	[%]
$t_x$	počet zákrutů na metr	[z/m]
$x$	počet zjištěných zákrutů	
$v$	rychlost čelisti	[mm/min]
$R_0$	elektrický odpor nulové délky	[ $\Omega$ ]
$R_L$	elektrický odpor délky $L$	[ $\Omega$ ]
$n$	faktor spojený se zeslabením elektrického odporu	
$P$	poměrná pevnost	[cN/tex]

## Úvod

Textilní materiál je jedním z nejstarších oděvních materiálů známý lidské populaci. Oděv již od dávných dob hraje velmi důležitou roli v oblékání. Už od počátku oděv plní funkci ochrannou, izolační i kulturní. Oděv ochraňuje pokožku od nepříznivých vnějších vlivů z okolního prostředí, poskytuje změnu vzhledu, umožňuje vyjádření společenského postavení, atd. V současné době se jeho působnost velmi rozšířila. Textilní výzkum a technologie začínají být dynamicky integrující.

V dnešní době textilie a textilní kompozity umožňují náhradu plastových i kovových součástí používaných např. v automobilovém průmyslu, stavebnictví, strojírenství, elektronice, elektrotechnice, medicíně a v mnoho dalších oblastech aplikací.

Lidská populace se stává více závislá na přítomné elektronice. V životě nás obklopuje mnoho elektronických zařízení, jako je mobilní telefon, MP4 přehrávač, notebook, atd., které nejsou velmi vhodné k nošení na lidském těle. V budoucnu se budou elektronické systémy nenápadně zabudovávat do klasického oděvu. Tohoto bude možno docílit použitím elektricky vodivých textilních struktur se zachováním vlastností známých z klasických oděvních textilií.

Tato práce je zaměřena na studium elektromechanických vlastností textilních útvarů se zvýšenou elektrickou vodivostí. Elektrická vodivost je jedním z hlavních rozhodujících parametrů pro zlepšování odolnosti vůči elektromagnetickému smogu, snižování tendence k hromadění elektrostatického náboje a konstrukce inteligentních textilií obsahující vodivé cesty. Elektricky vodivé textilie se velmi často používají ve speciálních oděvních a technických textiliích, za účelem nahradit kovy, resp. jiné materiály pomocí textilních struktur.

Teoretická část práce se zabývá textilními materiály se zvýšenou elektrickou vodivostí. Jako textilní struktury se zvýšenou elektrickou vodivostí je možno označit elektricky vodivá vlákna, elektricky vodivé příze a elektricky vodivé textilie. Mezi elektricky vodivá vlákna můžeme řadit vlákna kovová a pokovená, vodivá kompozitní polymerní vlákna, bikomponentní vlákna, uhlíková vlákna a nanovlákna i vlákna z vodivých polymerů. Zmíněny jsou vlastnosti, výroba a popis těchto vláken. Popsány jsou možnosti výroby textilií se zvýšenou vodivostí. Elektricky vodivé textilie mohou být vyrobeny z přízí obsahující výše zmíněná elektricky vodivá vlákna, mezi další postupy výroby patří pokovování, povrstvování vodivými polymery,



prosycování vodivými částicemi, potištění vodivými polymery, či prošívání vodivými přízemi. Na závěr teoretické části práce jsou zmíněny elektrické vlastnosti textilií, délkových textilních útvarů, možnosti ovlivňování elektrické vodivosti materiálů a současný stav výzkumu v oblasti studia elektromechanických vlastností textilií.

V praktické části byly studovány elektrické, mechanické a elektromechanické vlastnosti délkových i plošných textilních útvarů se zvýšenou vodivostí. Zvýšení elektrické vodivosti bylo docíleno zakomponováním staplového kovového vlákna do struktury příze. Elektrické vlastnosti byly zkoumány pomocí dvou vodičové metody a elektromechanické vlastnosti byly studovány pomocí tahového namáhání. Výsledky elektrických, mechanických a elektromechanických vlastností délkových i plošných textilních útvarů byly vyhodnoceny a graficky interpretovány. U elektrických vlastností délkových textilních útvarů byla hodnocena závislost elektrického odporu na upínací délce příze, obsahu vodivé komponenty v přízi, jemnosti příze a zákrutu příze. U mechanických vlastností délkových textilních útvarů byla sledována závislost průměrné pevnosti, průměrné poměrné pevnosti a průměrné tažnosti na obsahu vodivé komponenty v přízi. U elektromechanických vlastností délkových textilních útvarů byla hodnocena závislost elektrického odporu příze a smyčky na relativním prodloužení a závislost změny elektrického odporu  $\Delta R/R_0$  příze a smyčky na namáhání (deformaci). U elektromechanických vlastností plošných textilních útvarů byl sledován vliv relativního prodloužení pleteniny na její elektrický odpor.

Cílem práce je určit vhodnost použití studovaných přízí pro konkrétní aplikace a navrhnout konkrétní funkční výrobek obsahující studované hybridní příze.

## 1. Textilní materiály se zvýšenou elektrickou vodivostí

Textilní průmysl již řadu let využívá kovová vlákna za účelem tvorby dekorativních textilií. Za první elektricky vodivou textilií lze považovat hedvábnou organzu, která obsahuje dva typy přízí. Osnova je tvořena plochou hedvábnou přízí a útek je tvořen hedvábnou přízí ovinutou tenkou měděnou folií [1].

Dříve se vodivé materiály používaly především v technických aplikacích. Jako elektro-textilie je možno označit textilní struktury, které jsou dostatečně elektricky vodivé nebo poskytují elektronickou či výpočetní funkci [2]. Tyto textilie mohou plnit řadu funkcí, jako jsou antistatické aplikace, stínění elektromagnetického pole, elektronické aplikace, pohlcování infračerveného záření nebo ochranné oděvy ve výbušném prostředí.

Řada textilních výrobků s řízenými elektrickými vlastnostmi již byla vyvinuta, jde např. o oblast elektromagnetického stínění, snížení tendence k hromadění elektrostatického náboje, odporového ohřívače, atd., o kterých je zmíněno v příspěvku [3]. Při výrobě vodivých textilií určených pro oděvní průmysl je nutno brát ohled na následující omezení. Textilní materiály určené pro oděvy musí být ohebné a pružné, aby byl dosažen komfort nošení. Textilní materiály by měly mít nízkou ohybovou a smykovou tuhost, aby byly snadno deformovatelné a splývavé. Z uvedených důvodů by textilie měla mít nízkou plošnou hmotnost (např.  $150 \text{ g/m}^2$ , ne více než  $300 \text{ g/m}^2$ ) a použitá vlákna by měla být jemná ( $< 1 \text{ g/km}$ ). Pro dosažení zvýšené elektrické vodivosti jsou vlastnosti používaných textilních materiálů často v rozporu s uvedenými požadavky.

Kovy, uhlík a vodivé polymery jsou celkem křehké materiály. Oděvní textilní technologie se zaměřují na vývoj a tvorbu zpracovatelných vláken a přízí složených z výše uvedených materiálů. Metody pro výrobu vodivých vláken zahrnují:

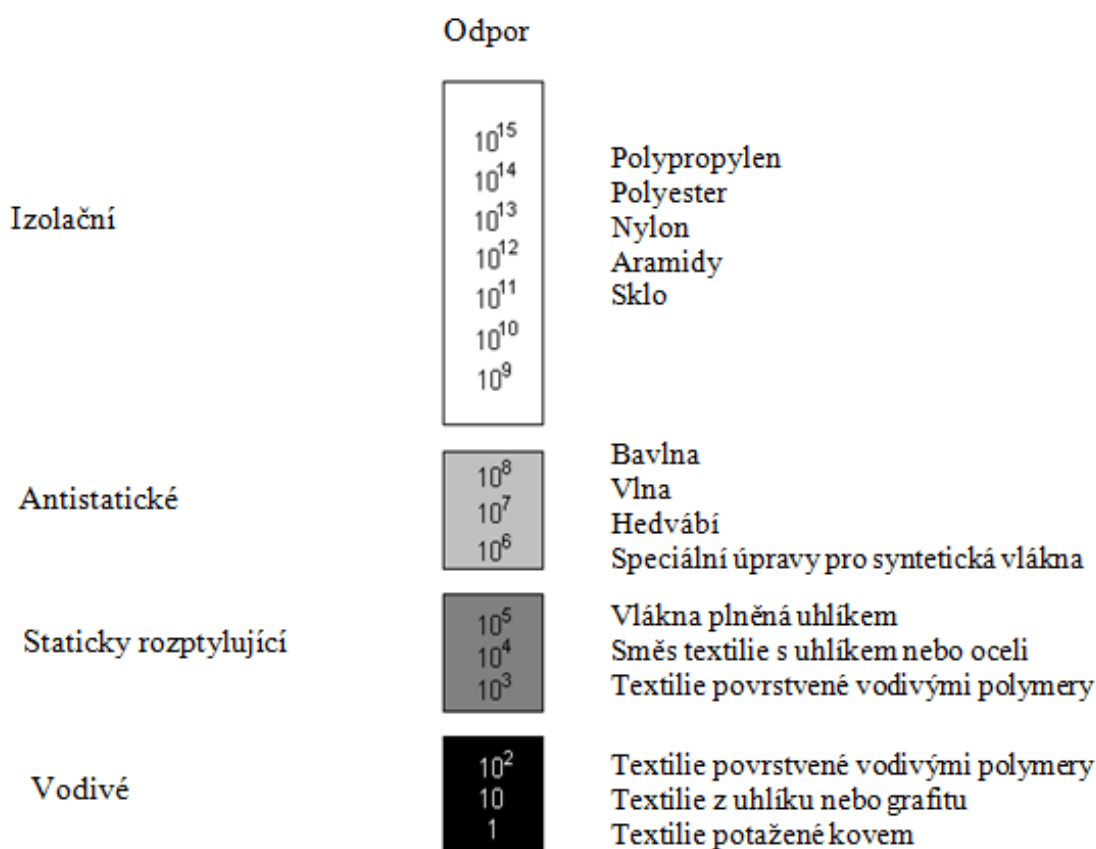
- použití nekonečných či staplových vláken tvořených zcela elektricky vodivým materiálem (uhlíková vlákna, kovová vlákna, atd.),
- plnění tradičních vláken vodivými částicemi ve formě aditiv (uhlíkové a kovové částice, elektricky vodivé polymery),
- povrstvování klasických vláken vodivými polymery či kovy,
- přípravu polymerů, jejichž chemická struktura zajišťuje zvýšenou elektrickou vodivost,
- elektricky vodivá bikomponentní vlákna.

## 1.1 Elektricky vodivá vlákna

Převážně většina textilních vláken se zařazuje do skupiny elektrických izolátorů. Elektrická vodivost textilních vláken není zcela nulová a závisí na obsahu různých aditiv a obsahu vlhkosti. Textilní vlákna dosahují vysokých hodnot specifického elektrického odporu  $\rho$ . Závislost specifického odporu na obsahu vlhkosti se používá pro měření vlhkosti materiálů na textilní bázi [4]. V tabulce 1 jsou uvedeny hodnoty specifického elektrického odporu  $\rho$  [ $\Omega\text{m}$ ] vybraných textilních vláken. Porovnání povrchové rezistivity plošných textilií různého materiálového složení je zobrazeno na obrázku 1.

Tab. 1: Specifický elektrický odpor  $\rho$  [ $\Omega\text{m}$ ] při 65 % relativní vlhkosti vzduchu a 20 °C teplotě vzduchu [4].

Textilní vlákna	CO	WO	LI	SE	CA	PA6	PA6.6	PAN	PES	PP
$\ln(\rho)$	5,6	7,3	5,9	8,7	10,6	13	11	14	17	12,5



Obr. 1: Povrchové rezistivity textilních výrobků. Elektrické vlastnosti jsou hodnoceny prostřednictvím povrchové rezistivity uvedené v [ $\Omega$ ] [5].

Vodivá vlákna mohou být vyrobena jako hedvábí nebo v staplových délkách a mohou být kombinována s tradičními nevodivými vlákny pro tvorbu přízí, které mají různý stupeň vodivosti. Vodivé příze mohou být také vytvořeny obalením nevodivé příze pomocí kovových vrstev mědi, stříbra nebo zlaté fólie a mohou být použity pro výrobu elektricky vodivých textilií [6].

V následujících podkapitolách budou popsány vybrané skupiny vodivých vláken používaných pro tvorbu textilií se zvýšenou vodivostí.

## 1.1.1 Kovová vlákna

Historie kovových vláken je velmi stará a sahá až do 3000 let před Kristem, jak je uvedeno v příspěvku [7]. Už v dávné době se kovové dráty využívaly pro dekorativní účely. V současné době se používají velmi jemná kovová vlákna (průměru cca 10  $\mu\text{m}$ ) při výrobě tkaných textilií, pletenin, netkaných textilií či při oplétání. Kovová vlákna se používala v oblasti technických textilií zejména díky své vodivosti a ohebně neměnným vlastnostem. Stále vyšší sklon k výrobě jemnějších kovových vláken zůstává nezměněn. Čím dál více se vyrábějí a zpracovávají vlákna průměrů od 1  $\mu\text{m}$ .

Kovy jsou užitečné v praktických aplikacích, kdy je požadována vysoká vodivost, např. mikroelektromechanické systémy, elektromagnetické stínění, odporový ohřev nebo přenos signálu. Uhlíková vlákna mají v mnoha směrech srovnatelné vlastnosti s kovovými vlákny. Použití kovových vláken skýtá také určité nevýhody. Nejen, že jsou kovová vlákna drahá, ale mohou být až šestkrát těžší než většina textilních vláken. Tudíž se homogenní směs obtížně produkuje. Kromě toho kovová vlákna jsou křehká a mohou se obrušovat při předení [8].

Směšové materiály jsou zpracovatelné klasickými textilními technologiemi, ale komfort vlastností, odolnost proti opotřebení a údržby mohou být omezené zejména, v případě zvýšeného obsahu kovu [8].

### 1.1.1.1 Materiály

Kovová vlákna mohou být vyrobena z vodivých čistých kovů, slitin či polokovů. Kovovými vlákny označujeme velmi tenká vlákna o průměru v rozmezí 1 až 80  $\mu\text{m}$ . Mezi čisté kovy běžně používané patří: zlato, stříbro, měď, hliník a to z důvodu jejich

dobrých zpracovatelských vlastností jako je měkkost a ohebnost. Nikl, zinek, cín, titan, železo, nebo také molybden a platina jsou využívány v závislosti na účelu jejich aplikace [6, 7].

Kovová vlákna mohou být také vyrobena z velkého množství slitin. Mezi významné slitiny patří: ocel ve všech formách, slitiny mědi, slitiny hliníku a železa, mosazné, bronzové, nikl-titanové slitiny, slitiny titanu a chromu. Čisté kovy mají většinou odlišné vlastnosti než tyto slitiny kovů. Mívají odlišnou barvu, lesk, pevnost a slévatelnost. Bod tavení těchto slitin je obvykle pod bodem tavení původních materiálů, pevnost však překračuje původní hodnoty [7].

## *1.1.1.2 Výroba kovových vláken*

Použitím různých metod technologického postupu výroby lze vyrábět kovová vlákna i dráty. Tyto metody technologického postupu výroby mohou být rozčleněny na mechanické a tepelné výrobní procesy. Mezi mechanické výrobní procesy patří např. tažení drátu, svazkové tažení nebo metoda řezání. Mezi tepelné výrobní procesy patří např. Taylorova metoda, zvlákňování do rotující tekutiny nebo metody vytahování taveniny [7, 9].

## *1.1.1.3 Vlastnosti kovových vláken*

Produkce kovových vláken je velmi nákladná, ale použití kovových vláken nabízí mnoho charakteristických předností, mezi které patří: dobrá odolnost vůči vysokým teplotám asi přes 1090 °C, vysoká pevnost v tahu, vysoké prodloužení do přetrhu, vysoká ohebnost, nehořlavost, nenasákavost, možnost praní, rozměrová stabilita, odolnost vůči chemikáliím. Nevýhodou těchto kovových vláken je vysoká hustota (např. hustota nerezové oceli je kolem 7,88 g/cm<sup>3</sup>) a tuhost (u většiny textilních materiálů je Youngův modul kolem 500 000 a u většiny kovů je kolem 10 000 000). Tepelná a elektrická vodivost kovových vláken spolu s jejich magnetickými vlastnostmi nabízejí v kombinaci s polymerními vlákny nové možnosti aplikace [10].

Vlákna se dále mohou ještě odlišovat v závislosti na technologickém postupu výroby, např. tvarem příčného průřezu vlákna a povrchovou stálostí. Pevnost v tahu vzroste se snižujícím průměrem drátu a ohebnost se zvýší [11]. V tabulce 2 jsou uvedeny hustoty, vodivosti a pevnosti v tahu různých kovů.

Tab. 2: Porovnání vlastností kovů [11].

	<b>Hustota [kg/dm<sup>3</sup>]</b>	<b>Vodivost [Sm/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Pevnost v tahu [N/mm<sup>2</sup>]</b>
<b>Měď</b>	8,9	58,5	220-270
<b>Hliník</b>	2,7	36	120-140
<b>Poměděný hliník (10%)</b>	3,3	37,7	130-180
<b>Slitina měď-nikl</b>	8,9	40	220-350
<b>Mosaz</b>	8,7	25,3	340-390
<b>Stříbro (99,9%)</b>	10,5	62,5	170-220
<b>Pokovená měď</b>	8,9	58,5	220-270
<b>Nerez-ocel</b>	7,9	1,36	740-840

## 1.1.2 Pokovená vlákna

Elektricky vodivá vlákna lze vyrábět prostřednictvím povrstvování vláken kovy, galvanickými materiály nebo solemi kovů. Výhodou této metody povrstvování je vhodnost aplikace pro mnoho typů vláken a získání vynikající vodivosti bez zásadních změn dosavadních vlastností substrátu, jako je měrná hmotnost, flexibilita a omak. Povrstvování lze aplikovat na povrch vláken, přízí nebo textilií za účelem vytvoření elektricky vodivé textilní struktury. Problémy však může způsobit adheze mezi kovem a vláknem, stejně tak jako odolnost vůči korozi [12].

### 1.1.2.1 Metody pokovování

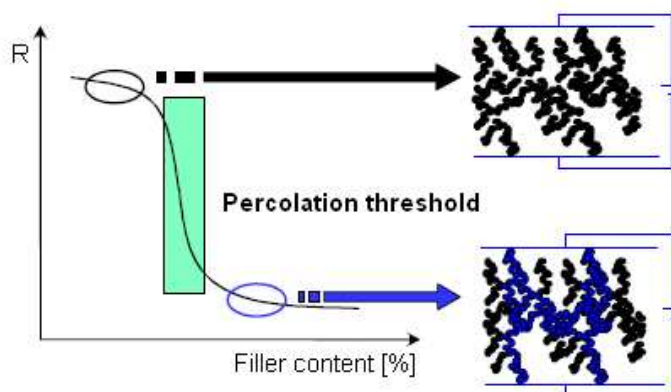
Používané postupy pokovování textilií obsahují nanášení kovového prášku. Používají se různé metody pokovování, mezi které patří: pokovování s pojivem, vakuové napařování, katodové napařování a chemické nanášení (bezproudové elektrolytické nanášení) [12, 13, 14].

### 1.1.2.2 Vlákná obsahující kov, oxidy kovů a soli kovů

Vodivá vlákna mohou být připraveny povrstvením vláken kovovými solemi, jako je sulfid mědi a jodid mědi. Kovovými povlaky lze docílit vysoce vodivých vláken, ale problémy může způsobovat přilnavost a odolnost proti korozi [6].

## 1.1.3 Vodivá kompozitní polymerní vlákna

Vodivá kompozitní polymerní (CPC – conductive polymer composites) vlákna se získávají rozptýlením vodivých částic, jako je uhlík, prášky kovů, grafit v termoplastické nebo termosetické nevodivé polymerní matrici. Elektrická vodivost CPC závisí zejména na tvaru vodivých částic a na obsahu vodivého plniva, ale i na jeho fyzikálně chemických vlastnostech, jako je povrchová energie, tvarový faktor, specifický povrch, schopnost shlukování, jak je uvedeno v příspěvku [15]. Vodivé kompozitní polymerní materiály vyžadují, aby v izolačním polymeru bylo vodivé plnivo rozptýleno rovnoměrně. Výsledkem je nekonečná síť schopná zajistit tok elektronů. Materiál je pak elektricky vodivý, pokud objemový specifický odpor klesne pod  $10^8 - 10^6 \Omega\text{cm}$  [16]. Na obrázku 2 je znázorněn elektrický odpor jako funkce obsahu vodivého plniva v materiálu.



Obr. 2: Elektrický odpor jako funkce obsahu vodivého plniva v materiálu [15].

Perkolační práh je definován jako nejnižší koncentrace vodivých částic, při které jsou tvořeny vodivé cesty. Je možno jej stanovit z experimentální závislosti elektrického odporu vodivého kompozitního materiálu na koncentraci vodivého plniva [16].

Elektrický perkolační práh při určité teplotě není jediným přechodem, který může být pozorován u vodivých polymerních kompozitů (CPC), jak je zmíněno v příspěvku [15]. Každý vnější tlak pravděpodobně učiní změnu v mezičásticových prostorech mezi vodivými prvky. Tento jev může následně vést k významným změnám v elektrickém odporu, tzn. přechod mezi vodičem a izolátorem.

Elektrická vodivost se zajistí buď přímým kontaktem mezi vodivými částicemi, nebo pomocí tunelového efektu bez přímého kontaktu, jak je zmíněno v příspěvku [17]. A to pouze v případě, jsou-li vodivé částice velmi blízko sebe navzájem. Elektrická vodivost není dostatečná, pokud jsou vodivé částice velice dobře rozptýlené a s velice

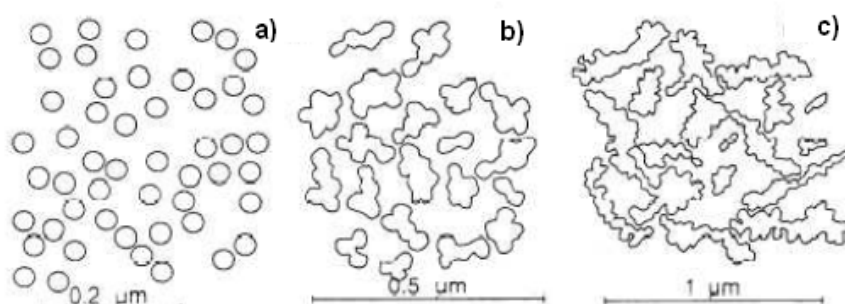
nízkou koncentrací. V textilních aplikacích je vhodné použít nižších koncentrací vodivé komponenty pro udržení mechanických vlastností vláken. Tento problém lze poměrně obtížně řešit, musí být nalezeno optimum.

### *1.1.3.1 Polymery plněné uhlíkovými sazemi*

Amorfní formou uhlíku jsou uhlíkové saze (CB) se strukturou podobnou neuspořádanému grafitu. Nepřetržitě reagují atomy uhlíku i aromatické radikály a vytvářejí vrstevnaté struktury složené z hexagonálních kruhů atomových uhlíků, které formují krystalografické struktury a následně tvoří základní agregáty. Tok elektronů probíhá konjugovanými vazbami uvnitř elementárních částic agregátů. Proto může být pozorováno zvýšení elektrické vodivosti v částicích uhlíkových sazí [18].

#### Elektrická vodivost uhlíkových sazí

Ve struktuře uhlíkových sazí je rozhodující velikost částic uhlíkových sazí, velikost agregátů a tvar elementárních částic. Uhlíkové saze obsahující relativně mnoho elementárních částic jsou vysoce strukturní, pokud se skládají z několika základních částic, pak jsou nízko strukturní [19, 20]. Vysoce strukturní uhlíkové saze dosahují vyšší elektrické vodivosti. Na obrázku 3 jsou schematicky znázorněny struktury uhlíkových sazí.



Obr. 3: Schematický popis kompozitu složeného z uhlíkových sazí: a) nízko strukturní, b) střední, c) vysoce strukturní [19].

#### Vlákna obsahující uhlíkové saze

Elektricky vodivé materiály musí obsahovat velké množství uhlíkových sazí, aby bylo dosaženo perkolačního prahu. Hlavním problémem při výrobě vláken je především zvlákňování a dloužení. Při výrobě vodivých textilních vláken zvlákňováním z taveniny byl polymer smíchán s uhlíkovými sazemi v tavenině. Vodivost se zvyšovala se zvyšujícím obsahem vodivých sazí a zároveň klesá, čím více jsou vlákna dloužena [21].

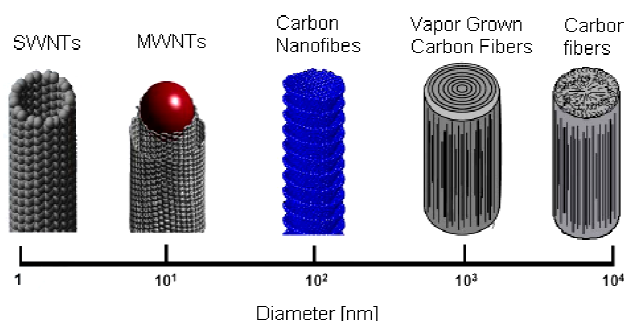


## 1.1.3.2 Vlákna plněná uhlíkovými nanotubicemi

Uhlíkové nanotrubice poskytují možnosti využití v rozsáhlých oblastech aplikací díky jejich vzácné jednorozměrné struktuře, mimořádným fyzikálním vlastnostem (jako je nízká hmotnost, vysoký poměr šířky/délky, dobrá elektrická a tepelná vodivost) a vynikajícím mechanickým vlastnostem [22].

### Uhlíkové nanotrubice

Uhlíkové materiály lze získat ve velkém množství modifikací a forem, jako je grafit, diamant, uhlíková vlákna, fullerény, uhlíkové nanotrubice či nanorohy [23]. Porovnání různých vlákněných forem uhlíku a grafitu je znázorněno na obrázku 4.



Obr. 4: Porovnání různých vlákněných forem uhlíku a grafitu [15].

Poprvé byly popsány uhlíkové nanotrubice v roce 1991 Sumiou Iijimou v Japonsku [24]. Nanotrubice jsou vrstvy grafitu stočeného do bezešvých válců, které mají téměř v celém objemu stejnou tloušťku a mohou být jednovrstvé (single walled nanotube - SWNT) nebo vícevrstvé (multiwalled nanotube - MWNT).

### Vlastnosti uhlíkových nanotubic

Důvod praktického zájmu o uhlíkové nanotrubice je z hlediska jejich elektrické vodivosti. Jejich vodivost je funkcí disymetrie, stupně stočení a jejich průměru. Uhlíkové nanotrubice se mohou chovat jako vodiče nebo polovodiče [23].

Elektrická vodivost uhlíkových „kovových“ nanotubic se pohybuje v řádech 10<sup>4</sup> S/cm [25]. Při pokojové teplotě mohou dosahovat tepelné vodivosti až 6600 W/mK [26]. Pevnost v tahu je až 200 GPa. Vícevrstvé nanotrubice mají hustotu 2,6 g/cm<sup>3</sup> a u jednovrstvých nanotubic je hustota v rozmezí od 1,33 g/cm<sup>3</sup> do 1,4 g/cm<sup>3</sup>. Jsou schopni zachycovat velké objemy plynů, iontů, vyztužovat polymerní vlákna a sloužit jako základní materiál v nanotechnologiích [27].

Uhlíkové nanotrubice jsou vhodné pro výrobu nanokompozitních materiálů [28]. Výhodou uhlíkových nanotubic je kombinace velice malého průměru a velmi dobrých mechanických i elektrických vlastností [15].

## Vlákna obsahující uhlíkové nanotrubice

Používají se různé metody tvorby nanotubic, např. tvorba čistých nanotubicových vláken nebo vláken kombinující vlastnosti polymerních materiálů a nanotubic [29, 30].

K prakticky používaným technikám pro tvorbu nanotubicových kompozitních materiálů patří odlévání roztoku, zvlákňování z taveniny a zvlákňování za mokra. Objevila se také nová metoda výroby pomocí techniky elektrospiningu. Jedná se o velmi jednoduchou metodu pro tvorbu polymer-uhlíkové nanotrubice nanokompozitních vláken [30].

### *1.1.3.3 Vlákna plněná kovovými částicemi*

Byla objevena nová generace materiálů a to plasty plněné kovy s ohromnými možnostmi nahrazení kovů ve speciálních aplikacích. Tyto možnosti plynou hlavně z důležité modifikace tepelných a elektrických vlastností polymerů ve směsi s kovovými plnivý [31].

Během posledních let byla vytvořena nová řada vodivých vláken, která byla vyrobena nanosením vysoce vodivých kovů, jako je nikl, měď a stříbro metodou bezproudového pokovování nebo naprašování kovů. Velmi tenká vrstva kovu zajišťuje elektrické vlastnosti bez významné změny vlastností vlákna. Polymerní pokovená vlákna mohou trpět teoretickou únavou nebo oddělením vodivé vrstvy tepelnými nebo chemickými jevy během užívání či praní [31].

## Metody výroby kovových prášků

Převážná většina kovů a jejich slitin se získává ve formě prášků. Výrobní metody závisí na druhu kovu, množství, čistotě požadovaného prášku, ekonomičnosti postupu, velikosti a tvaru částic. Prášky lze vyrábět fyzikálními a mechanickými pochody nebo chemickými a elektrochemickými pochody [31].

Rozprašování kapalného kovu je nejvhodnější při zpracování předem legovaných prášků. Elektrolytickou redukcí jsou připraveny velmi čisté prášky, které mají nepravidelný tvar a jsou drahé [31].

## Elektrická vodivost v kompozitech kov/polymer

K získání řízené elektrické vodivosti v kompozitech kov/polymer se musí metody rozlišovat. Lze dosáhnout dobré vodivosti na molekulární úrovni polymeru. Metody pro získání vynikající elektrické vodivosti mohou být takto rozčleněny:

- a) Vysoko objemové plnění kovovými částicemi s použitím jemných částic zlata, stříbra a mědi.
- b) Patenty nabízející empirická data pro tvorbu specifických směsí částic dvou nebo více velikostí pro zajištění dobré adheze a vysoké elektrické vodivosti.
- c) V určitých případech jsou uhlíkové saze používány pro snížení množství cenově nákladných prášků, jako je zlato a stříbro [31].

## Výroba vláken obsahující kovové prášky

Tradiční způsob výroby kompozitu je mechanické vmísení kovových částic do roztavené nebo rozpuštěné polymerní matrice před zahájením zvlákňování. Tento výrobní postup velmi často vede k nehomogennímu rozptýlení částic v matrici. Nevýhody použití kovových prášků v porovnání s použitím uhlíkových sazí jsou vysoká měrná hmotnost a cena [15,31].

### *1.1.3.4 Vlákná plněná nanočásticemi solí kovů*

O kovové nanočástice je velký zájem především kvůli jejich možnému použití např. v biomedicíně, elektronických a optických zařízeních. Zvýšená pozornost je věnována in-situ syntéze kovových nanočástic v polymerních matricích. Při této výrobě se soli kovů nejprve rozpustí v monomeru, následuje polymerizace a redukce kovových iontů použitím záření a tepelných procesů [32].

K výrobě mezoporézních vláken v nano nebo submikronovém měřítku obsahující oxidy kovů je možno použít elektrostatické zvlákňování. Výrobní proces v sobě zahrnuje následující kroky:

- přípravu solí s vhodným anorganickým prekursorem a polymerním obsahem,
- zvlákňování roztoku,
- zvápenatění kompozitních vláken [32].

## 1.1.4 Bikomponentní vlákna















Ve vlákenném inženýrství vznikl milník při kombinaci dvou různých komponent v jediném bikomponentním vlákně. Touto technologií lze získat vlákna speciálních vlastností i struktur a jejich použitím získat specifické textilní produkty [33].

Existuje spousta technologických procesů výroby bikomponentních vláken a mikrovláken, které vedou k velkému množství aplikací. Nejběžnější oblastí použití bikomponentních vláken je oděvní a nábytkářský průmysl, filtrace a medicínské aplikace. Tato vlákna jsou používána i jako nahrazení hedvábí a jako elektricky vodivá vlákna či mikrovlákna [33].

### 1.1.4.1 Definice bikomponentních vláken

Bikomponentní vlákna jsou syntetická vlákna složená ze dvou polymerů odlišné chemické nebo fyzikální struktury, které jsou pevně, ale oddělitelně spojeny. Polymery jsou zvlákňovány ve vlákna pomocí speciální zvlákňovací trysky buď vedle sebe (typ side-by-side), obklopením jednoho proudu taveniny dalším proudem taveniny (typ core/sheath), nebo jako směs s nehomogenní distribucí. Rozdíl mezi vlákny bikomponentními a vlákny z polymerních směsí je, že tyto dva polymery nevytváří nový polymer [33].

Výroba různých bikomponentních vláken závisí na typu zvlákňovací trysky (viz obr. 5). Mohou se rozlišit tři základní typy: typ strana/strana (S/S), typ jádro/plášť (C/S) a typ matrice/vlákno (M/F) [33].

Family	Bicomponent Fibres Variants					
Side-by-Side						
	50/50	20/80	Different viscosities	ABA	Trilobal	Conductive
Core/Sheath						
	50/50	90/10	Eccentric	Trilobal	Conductive	
Matrix/Fibril	Islands-in-the-sea					
	Segmented-Pie / Multi-Layer					
			Segmented-Pie			
						
			Multi-Layer			

Obr. 5: Různé varianty bikomponentních vláken [33].

Pro výrobu bikomponentních vláken se používají různé metody výroby, mezi které patří zvlákňování z taveniny, z roztoku a elektrostatické zvlákňování. V závislosti na typu bikomponentního vlákna dochází ke spojení buď před, nebo po opuštění zvlákňovací trysky. Když vlákno opouští zvlákňovací trysku, tak se skládá ze dvou nesmíchaných komponent a ty jsou spojeny v místě jejich styku [33].

## 1.1.4.2 Výroba bikomponentních vláken

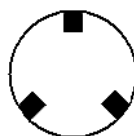
Bikomponentní vlákna dovolují např. zpracování polymerů plněných uhlíkem ve vlákna použitím druhého polymeru jako nosný substrát [34].

Vodivá komponenta je umístěná buď v jádře, nebo v plášti vlákna (viz obr. 6). V případě, že je vodivou komponentou tvořeno jádro vlákna, dosahujeme velmi dobrých zvlákňovacích vlastností a pevnosti vlákna. Povrchový odpor klesá, pokud je vodivá komponenta umístěna v plášti [35].



Obr. 6: Umístění vodivých uhlíkových sazí v bikomponentním vlákne [35].

Další možné umístění vodivé komponenty v bikomponentním vlákne je uvedeno na obrázku 7 [34].



Obr. 7: Umístění vodivé komponenty v bikomponentním vlákne [34].

## 1.1.5 Uhlíková vlákna a nanovlákna

Uhlíková vlákna představují novou skupinu vysoko pevnostních materiálů. Uhlíkové vlákno je definováno jako vlákno tvořeno alespoň 90 % uhlíku získaného při kontrolované pyrolýze vhodných vláken [36].

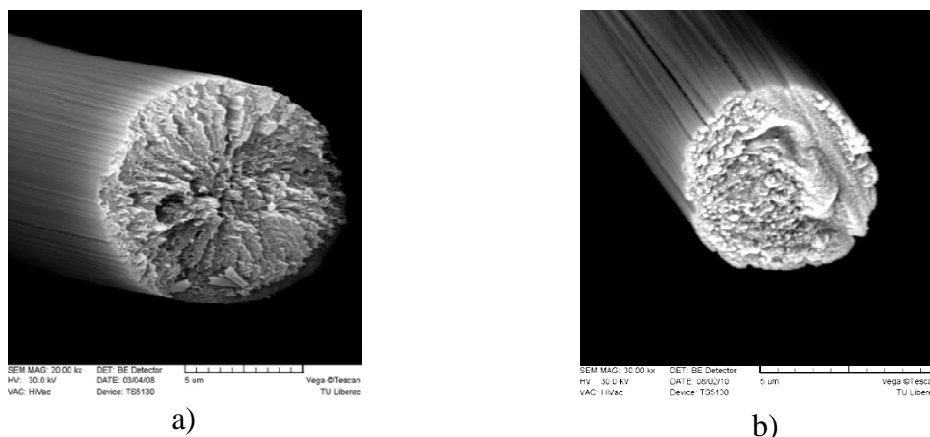
Jejich atraktivní vlastnosti umožnily zvětšení oblastí aplikací uhlíkových vláken, které není možno získat v jiných materiálech, jako je pevnost, relativně vysoká elektrická vodivost, stabilita při vystavení reaktivnímu okolí, nízká hustota, nízký až negativní koeficient tepelné roztažnosti a odolnost vůči tepelným rázům. Mezi

nejběžnější aplikace uhlíkových vláken lze zařadit sorpční materiály, materiály odolné vůči elektrostatickému nabíjení, katalyzátory a výztužné kompozitní materiály [37].

## 1.1.5.1 Struktura a výroba uhlíkových vláken

Uhlíková vlákna se v nynější době vyrábějí především z vláken polyakrylonitrilových (PAN) a nejnovější z vláken novoloidu (vlákna fenol-aldehydových). Viskóza se téměř nevyužívá, protože při přeměně za vysokých teplot dochází k velkým ztrátám hmoty, např. při karbonizaci viskózy na uhlíkové vlákno se přemění pouze 25 % hmoty původního vlákna. V případě vláken vyrobených z PAN jsou ve směru osy vlákna protáhlé mikrokrystaly turbostatického uhlíku tvořeny vždy několika paralelními aromatickými rovinami. V příčném řezu jsou pásy různě stočeny a nedosahují větších rozměrů. Postup výroby uhlíkových vláken z PAN lze rozčlenit do tří etap, které jsou stabilizace, karbonizace a grafitizace [36, 37].

Při výrobě nejtužších uhlíkových vláken se používají smoly (zůstatky po destilaci černého uhlí a ropy). Pouze tzv. mezifázové smoly poskytují vysoce tuhá a přitom pevná vlákna. Aromatické roviny se při zvlákňování smoly ve viskózním stavu orientují podél osy vlákna. Po stabilizaci vlákna oxidací následuje předkarbonizace, karbonizace a nakonec grafitizace [37]. Mikrostruktura uhlíkových vláken je znázorněna na následujícím obrázku 8.



Obr. 8: Mikrostruktura uhlíkových vláken: a) vlákno z mezifázových smol, b) vlákno z PAN [38].

## 1.1.5.2 Vlastnosti uhlíkových vláken

Vlastnosti uhlíkových vláken závisí hlavně na výběru výchozího polymerního materiálu, na podmínkách karbonizace a tepelné úpravy i na zavedení určitých aditiv [38]. Základní vlastnosti vybraných uhlíkových rovingů jsou uvedeny v tabulce 3.

Tab. 3: Porovnávání vlastností vybraných uhlíkových vláken [38].

Výrobce	Typ	Prek.	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	Pevnost [MPa]	Modul [GPa]	Prodloužení [%]	Rezistivita [mΩcm]
Toho	IMS60	PAN	1,80	5600	290	1,9	1,45
Toho	UTS50	PAN	1,79	4800	240	2	2,05
Celion CF	Celion	PAN	1,78	3400	230	2,2	1,82
Celion CF	Celion	PAN	1,78	3400	230	2,2	1,82
Mitsubishi	Dialed	Pitch	2,12	2620	630	0,4	0,66
Nippon	Granoc	Pitch	2,17	3430	780	0,5	0,50
Zoltec	Panex 35	PAN	1,81	4137	242	1,5	1,55
Toray	T700S	PAN	1,80	2550	135	1,7	1,60

Uhlíková vlákna se vyznačují těmito vlastnostmi: anizotropií mechanických vlastností (ve směru kolmém k ose vlákna mají vlákna modul pružnosti významně menší), křehkostí (prodloužení do přetržení je menší než u skleněných vláken, minimální poloměr při ohýbání je proto větší než u skleněných vláken), záporným koeficientem délkové teplotní roztažnosti  $\alpha$  a v podélném směru mají uhlíková vlákna malý elektrický odpor. Prakticky lze specifický odpor uhlíkových vláken upravovat třemi základními způsoby:

- teplotně-časovým režimem v průběhu tvorby vlákna,
- orientovaným dloužením v průběhu tvorby a karbonizace,
- zavedením chemických sloučenin a funkčních skupin do struktury výchozího surového materiálu uhlíkových vláken [37].

## 1.1.5.3 Uhlíková nanovlákna

V současné době existuje velké množství metod výroby uhlíkových nanovláken, např. růst par, obloukový výboj, laserové rozrušování a chemická depozice z plynné fáze. Nový způsob přípravy prekursorových vláken a přízí s průměrem vláken v oblasti od submikronů do mikronů představuje technika elektrostatického zvlákňování.

Jako prekursor pro přípravu uhlíkových nanovláken pomocí stabilizačního a karbonizačního procesu se používají PAN netkané textilie nebo vlákna získaná elektrostatickým zvlákňováním. Tento typ uhlíkových nanovláknenných kompozitů má praktické využití v oblasti polovodičových zařízení, malých elektronických zařízeních, nabíjecích baterií a superkapacitorů [36, 37].

## 1.1.6 Vlákná z vodivých polymerů

V posledních 20 letech velkou pozornost přitahují elektricky vodivé polymery kvůli tomu, že najednou vynikají jak fyzikálními a chemickými vlastnostmi organických polymerů, ale také i elektrickými vlastnostmi kovů.

Odlišují se od vodivých vláknenných materiálů, které byly velmi úspěšně začleněny do textilií, jako jsou kovové dráty (těžké a nelze je prát), uhlíkem nebo kovem plněná syntetická vlákna (mechanické vlastnosti se zhoršují se stoupajícím obsahem vodivého materiálu) a grafitová vlákna (příliš tuhá a křehká). Vodivá polymerní vlákna jako je polyanilin jsou pevná (80 - 300 MPa), lehká (1,5 g/cm<sup>3</sup>), pružná (prodloužení je mezi 3 % a 20 %) a vysoce elektricky vodivá (300 - 1000 S/cm), tudíž jsou vhodná pro tkaní, pletení a další textilní výrobní procesy [39].

### 1.1.6.1 Vodivé polymery

Hlavní vlastností vodivých polymerů je pravidelné střídání jednoduchých a dvojných vazeb (konjugace) v molekulární struktuře. Dále je nezbytným předpokladem přítomnost pohyblivých nosičů náboje, které umožňují transport po konjugovaném řetězci. Nejjednodušším strukturním konjugovaným polymerem je polyacetylen. Důležitým zjištěním bylo, že když tenký polyacetylenový film (vrstvu) dopujeme parami jodu, vzroste elektrická vodivost filmu přibližně milionkrát [40].

Široce zkoumán byl polypyrrol (PPy) kvůli své dobré elektrické vodivosti a dobré ekologické stabilitě v okolních podmínkách. Elektrická vodivost PPy zahrnuje pohyb kladně nabitých nosičů nebo elektronů podél řetězců polymeru a skákání z těchto nosičů mezi řetězci. PPy může dosáhnout vodivosti v rozpětí 10<sup>2</sup> Scm<sup>-1</sup> [6].



## Mechanismus vedení v konjugovaných polymerech

Elektrické vlastnosti materiálů (hlavně polovodičů) se popisují velmi často pomocí pásového modelu, který je popsán v kapitole 2.1.1 (pásový model pevných látek).

Vodivost u elektricky vodivých polymerů lze vysvětlit následujícím způsobem. Vytváření volného místa (kvazičástice, díry) se provádí při odstranění elektronu z vrchní valenční vrstvy pomocí oxidace. Dochází tedy k částečnému přemístění na více monomerních jednotkách a tyto jednotky se strukturálně přetvářejí. Částečně přemístěna kvazičástice se nazývá polaron. Bipolaron obsahuje dva náboje. Polarony jsou vytvářeny při nízkých oxidačních stupních, zatímco bipolarony jsou tvořeny za vyšších oxidačních stupňů. Polarony i bipolarony jsou pohyblivé v konjugovaném systému a tím dochází k vytvoření elektrického pole. Vodivost vytvořena pomocí polaronů a bipolaronů je hlavním mechanismem přenosu náboje v konjugovaných vodivých polymerech [40].

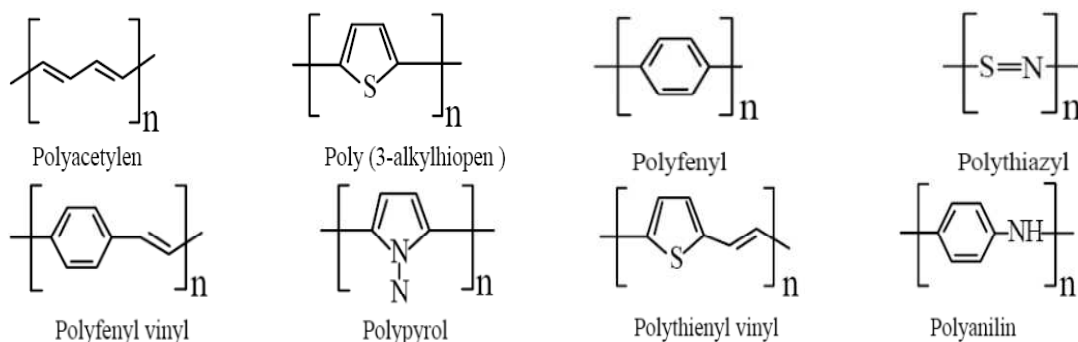
## Procesy dopování

Úprava konjugovaných polymerů se provádí pomocí dopování, tzn. dodáním elektronu (donoru nebo akceptoru) do konjugované struktury za účelem zlepšení jejich elektrických vlastností. P-dopováním se způsobí odstranění elektronů z valenčního pásu pomocí oxidačního činidla. Procesem N-dopování se dodávají elektrony do vodivostního pásu pomocí redukčního činidla. Elektrická vodivost se může zvýšit přidáním dopantů do konjugovaného polymeru až na hodnoty vodivosti kovů [40].

## Používané vodivé polymery

V dnešní době se vyrábí více než 100 polymerních materiálů s rozdílným rozsahem vodivosti. Některé tyto polymery lze zvláknovat, a proto je lze použít v textilních strukturách. K nejpoužívanějším vodivým polymerům patří polyacetylen (PA), polyanilin (PANI), polythiopen (PTh) a jejich deriváty, polypyrrol (PPy) a polyfenylenvinylen. Struktury vybraných vodivých polymerů jsou znázorněny na obrázku 9. Jsou to chemicky nebo elektrochemicky dopované  $\pi$ -konjugované polymery, což bylo zjištěno, že mají kovové vlastnosti [6, 40].

Jejich elektrické vlastnosti lze upravovat v širokém rozsahu, např. prodloužením nebo přidávkou rozdílných dopantů. Závislost elektrické vodivosti na teplotě je u polymerů rozdílná než u kovů nebo polovodičů. Elektrická vodivost zpravidla stoupá s klesající teplotou [40].



Obr. 9: Strukturní jednotky vybraných vodivých polymerů [8].

## Výroba vláken

Hlavním problémem zpracování přirozeně vodivých polymerů (ICP) je to, že většina z nich nemůže být zpracována z taveniny, kvůli jejich rozkladu při teplotách nižších než je bod tání. Nízká rozpustnost způsobuje další problém při zpracování [5].

Zvlákňování polymerních materiálů lze provádět dvěma základními způsoby: zvlákňováním z taveniny a zvlákňováním z roztoku. Převážná většina vodivých polymerů nemůže být zpracována z taveniny. V poslední době je věnována zvýšená pozornost elektrostatickému zvlákňování a to z důvodu výroby ultrajemných vláken. Mezi tři hlavní činnosti vývoje za účelem přípravy vláken z vodivých polymerů patří:

- 1) Vytlačování roztoku přirozeně vodivého polymeru zvlákňovací tryskou do koagulační lázně.
- 2) Smíchání vodivého polymeru s nevodivým polymerem a tvarování vlákna.
- 3) Pokrytí vlákna nebo textilie z nevodivých vlákenných materiálů vodivým polymerem [41].

Výroba vodivých vláken může být tvořena výhradně vodivými polymery, směšováním polyanilinových vláken, povrstvováním vláken vodivými polymery, in-situ polymerizací vodivých polymerů na textilní substrát, dvoustupňovým postupem tvorby vodivé vrstvy na textilní substrát a lze použít i další metody [41, 42].

## **1.2 Elektricky vodivé textilie**

V současné době již byla vyvinuta řada textilních produktů se zvýšenou elektrickou vodivostí např. v oblasti elektromagnetického stínění, odvodu elektrostatického náboje, atd. Při výrobě vodivých textilií určených pro oděvní průmysl je nutno brát v úvahu

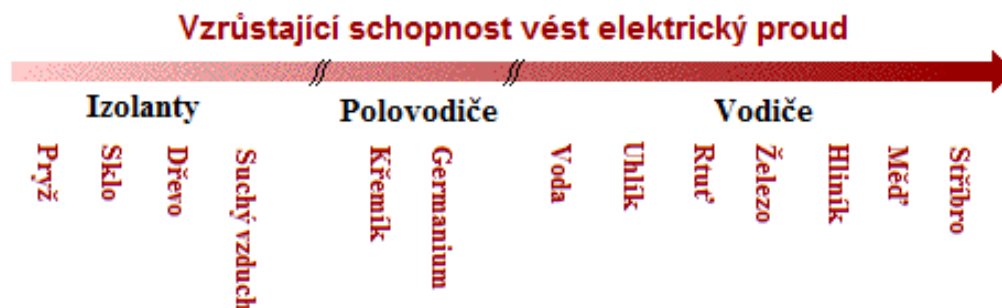
určitá omezení. Za účelem dosažení vysokého komfortu při nošení by měly být oděvní textilie ohebné a pružné, jak je uvedeno v příspěvku [3]. Čím více je oděv přiléhavý, tím více musí být oděvní textilie pružná. Kovy, uhlík a vodivé polymery jsou velmi tuhé a křehké materiály. Textilní inženýrství je zaměřeno na vývoj tvorby vláken a na vytváření nových možností, jak produkovat vodivé textilie z těchto materiálů. K základním metodám výroby vodivých textilií patří:

- Použití vodivých vláken. Vodivá vlákna je možno rozdělit do dvou základních skupin. První skupina zahrnuje přirozeně vodivá vlákna, jako např. kovová a uhlíková vlákna. V druhé skupině jde o vlákna, která jsou speciálně zpracována pro získání zvýšené elektrické vodivosti, jako např. vlákna povrstvená či plněná vodivými částicemi, viz kapitola 1.1 (elektricky vodivá vlákna). Tato vlákna je možno použít přímo pro výrobu netkaných textilií. V ostatních případech výroby textilních struktur (tkaniny, pleteniny) je potřeba vyrobit příze, které mohou být buď ze 100 % vodivého vlákna či směsové příze obsahující i nevodivá vlákna.
- Povrstvené textilie. Po výrobním procesu se nevodivé textilie mohou zpracovávat za účelem nanesení vodivé vrstvy. Vodivé vrstvy mohou být tvořeny např. kovem nebo vodivými polymery. Výsledné textilie mají zvýšenou povrchovou vodivost.
- Rozptýlení elektricky vodivých částic na připravené textilie. Nevodivé textilie (převážně netkané) jsou používány jako substrát, na který se nanáší vodivé částice, jako jsou saze nebo kovové částice. Tímto způsobem se dosahuje určitého stupně vodivosti textilie.
- Potištěné textilie. Elektricky vodivá struktura se nanáší pomocí tiskařských technik (např. sítotiskem) na připravenou textilií.
- Prošívané textilie. Vodivá struktura se vyšívá elektricky vodivými přízemi na nevodivou textilií.

Elektricky vodivé textilie jsou elektricky vodivá vlákna, příze a produkty z nich vyrobené. Ty lze získat různými způsoby. Vysoce flexibilní vodivé textilie lze připravit tkaním tenkých drátků z různých kovů, jako je mosaz a hliník. Tyto textilie byly vyvinuty pro vyšší stupeň vodivosti. Polovodičové textilie mohou být vyrobeny různými způsoby, např. impregnováním textilních materiálů vodivými uhlíkovými nebo kovovými prášky, vzorovaným tiskem, atd. [6].

## 2. Elektrické vlastnosti textilií

### 2.1 Vlastnosti elektrotechnických materiálů



Obr. 10: Schéma rozdělení materiálů podle vodivosti [4].

U látek umístěných v elektrickém poli mohou nastat dva krajní jevy:

- transport elektricky nabitých částic – vzniká elektrický proud doprovázený rozptylem energie; to je charakteristické pro vodiče,
- vznik dipólů a indukovaných dipólů doprovázený akumulací energie; tento proces je vratný a charakteristický pro izolanty (dielektrika) [4].

Materiály se rozdělují podle vodivosti na vodiče, polovodiče a izolanty (viz obr. 10). Vodiče jsou látky, které obsahují volné elektrické náboje (elektrony), tzn. že vodiče vedou elektrický proud [43]. Mezi vodiče se zařazují všechny kovy, které jsou základním materiálem pro výrobu kabelů, kontaktů, vinutí strojů, apod. Vyžaduje se u nich minimální elektrický odpor, maximální pevnost v tahu, tvrdost, odolnost vůči otěru a korozi [44].

Polovodiče jsou látky, které mají specifický odpor větší než kovové vodiče, ale menší než izolanty [45]. Vodivost polovodičů závisí na teplotě a osvětlení. Polovodiče mají oproti vodičům silnější vazbu mezi jádrem a elektrony. Ke vzniku volných elektronů potřebujeme dodat určité množství energie. Měrný odpor polovodičů se pohybuje kolem  $10^{-6}$  až  $10^8 \Omega\text{m}$  [44].

Izolanty jsou látky, které neobsahují volné elektrické náboje, tzn. že izolanty nevedou elektrický proud [43]. Převážná většina textilních vláken se zařazuje do skupiny elektrických izolantů. To je způsobeno tím, že všechny elektrony jsou vázané k atomovým jádrům nebo jsou spojeny v kovalentních vazbách. Elektrická

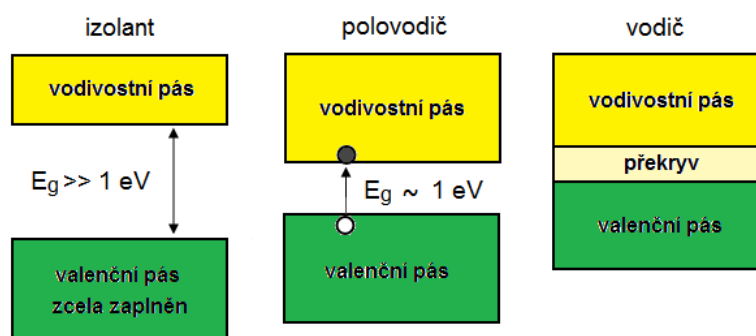
vodivost textilních vláken není zcela nulová a závisí na obsahu různých přísad, resp. obsahu vlhkosti. Již bylo experimentálně ověřeno, že pro hydrofilní polymery postačuje 1%-ní obsah vlhkosti, aby jejich vodivost vzrostla o 8 až 10 řádů [4].

Vodivost materiálu kvůli nosiči náboje je závislá na elektrickém náboji každého nosiče, jeho mobilitě (pohyblivosti) a koncentraci nábojů. Druhů nosičů náboje je mnoho, např. elektrony, otvory (díry), protony a ionty, ale obvykle jeden nosič náboje pravděpodobně dominuje. Mobilita je závislá na velikosti nosiče náboje a struktuře materiálu, jako u polymerů, izolátorů, kovalentního lepení a křišťálových struktur. Koncentrace nosičů náboje se může lišit od téměř nuly po více než jeden atom [8].

## 2.1.1 Pásový model pevných látek

Elektrické vlastnosti materiálů (převážně polovodičů) se nejčastěji popisují pomocí pásového modelu. Energetické pásy zobrazují dovolené energetické stavy elektronů v látce. Podle Pauliho vylučovacího principu mohou být pouze dva elektrony v jedné energetické hladině. Zakázanými pásy se od sebe oddělují dovolené pásy a v zakázaných pásech se nemohou vyskytovat elektrony. Valenční pás je tvořen hladinou valenčních elektronů. Vodivostní pás představuje oblast dovolených energií volných elektronů, které vyvolávají elektrický proud [44].

K vedení nedochází, jsou-li valenční i vodivostní pásy zcela zaplněny nebo prázdné. U vodičů je malá nebo téměř nulová šířka zakázaného pásu (viz obr. 11), vyskytují se v nich proto volné elektrony. U izolátorů je šířka zakázaného pásu natolik velká (větší než 3 eV = elektrovolt), že je pro elektrony prakticky nepřekročitelná. U polovodičů je možné při dostatečné energii tento pás překonat ( $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$  je práce potřebná k přemístění jednoho elektronu mezi místy s rozdílem potenciálů 1 V) [44].



Obr. 11: Pásový model látek [44].

## 2.1.2 Elektrický odpor $R$

Elektrický odpor  $R$  neboli rezistance je odpor, který brání průchodu elektrického proudu v elektrickém vodiči, na nějž je přivedeno elektrické napětí:

$$R = \frac{1}{G}, \quad (1)$$

kde  $R$  [ $\Omega$ ] je elektrický odpor a  $G$  [S] je elektrická vodivost [46].

Elektrický odpor vodiče  $R$  udává vztah mezi proudem  $I$  a napětím  $U$  mezi koncovými průřezy vodiče. Základní jednotkou elektrického odporu  $R$  je ohm [ $\Omega$ ]. Ohmův zákon říká, že proud procházející elektrickým vodičem vlivem unášení je přímo úměrný napětí:

$$I = \left(\frac{1}{R}\right) U, \quad (2)$$

$$R = \frac{U}{I}, \quad (3)$$

kde  $R$  [ $\Omega$ ] je elektrický odpor,  $I$  [A] je elektrický proud a  $U$  [V] je elektrické napětí [8].

Pro elektrický odpor  $R$  drátu či vlákna kruhového průřezu s délkou  $l$  platí vztah:

$$R = \frac{l \rho}{S} = \frac{4 l \rho}{\pi d^2}, \quad (4)$$

kde  $R$  [ $\Omega$ ] je elektrický odpor,  $l$  [m] je délka vodiče,  $\rho$  [ $\Omega\text{m}$ ] je specifický odpor,  $S$  [ $\text{m}^2$ ] je plocha průřezu vodiče a  $d$  [m] je průměr vodiče [4].

Elektrický proud  $I$  [A] je usměrněný pohyb volných částic s elektrickým nábojem. Zprostředkovávat elektrický proud mohou elektrony, ale i volné záporné a kladné ionty. Elektrické napětí  $U$  [V] je napětí mezi konci vodiče, které uvádí do pohybu elektrické náboje opačného nabití ve vodiči [43].

## 2.1.3 Elektrická vodivost $G$

Elektrická vodivost  $G$  je převrácená hodnota elektrického odporu  $R$  a základní jednotkou je siemens [S]:

$$G = \frac{1}{R}, \quad (5)$$

kde  $G$  [S] je elektrická vodivost a  $R$  [ $\Omega$ ] je elektrický odpor [47].

## 2.1.4 Specifický elektrický odpor $\rho$

Specifický (měrný) elektrický odpor  $\rho$  neboli rezistivita je veličina charakterizující elektrickou vodivost materiálu vodiče. Základní jednotkou specifického odporu  $\rho$  je ohmmetr [ $\Omega\text{m}$ ]. Je to závislost elektrického odporu vodiče  $R$  na jeho délce, příčném průřezu  $S$  a specifickém odporu materiálu vodiče  $\rho$ , která je vyjádřena vztahem:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (6)$$

$$\rho = \frac{R S}{l} = \frac{\pi d^2 R}{4 l}, \quad (7)$$

kde  $R$  [ $\Omega$ ] je elektrický odpor,  $\rho$  [ $\Omega\text{m}$ ] je specifický elektrický odpor,  $l$  [m] je délka vodiče,  $S$  [ $\text{m}^2$ ] je plocha průřezu vodiče a  $d$  [m] je průměr vodiče [43].

Elektrický odpor v kovových vodičích závisí na teplotě. S rostoucí teplotou roste elektrický odpor [43]. Specifický odpor mědi se pohybuje okolo  $0,0171 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  a kvůli tomu je měď jedním z nejlepších vodičů elektrického proudu [4, 48].

Materiály mají široký rozsah specifického odporu možná větší, než jakékoliv jiné fyzikální parametry. Velmi dobré vodiče mají specifický elektrický odpor menší než  $10^{-25} \text{ } \Omega\text{m}$ , typické kovové vodiče mají specifický elektrický odpor přibližně roven  $10^{-8} \text{ } \Omega\text{m}$ , polovodiče  $10^{-4}$  až  $10^{10} \text{ } \Omega\text{m}$  a izolanty  $10^{10}$  až  $10^{20} \text{ } \Omega\text{m}$  [8].

## 2.1.5 Měrná elektrická vodivost $\gamma$

Měrná elektrická vodivost  $\gamma$  je veličina, která popisuje schopnost materiálů dobře vést elektrický proud. Základní jednotkou měrné elektrické vodivosti je [S/m]. Měrná elektrická vodivost je převrácenou hodnotou specifického elektrického odporu:

$$\gamma = \frac{1}{\rho}, \quad (8)$$

kde  $\gamma$  [S/m] je měrná elektrická vodivost a  $\rho$  [ $\Omega$ m] je specifický elektrický odpor [49].

## 2.1.6 Součinitel elektrického odporu $\alpha$

Odpor kovů se udává při teplotě 20 °C a roste s teplotou přibližně lineárně v rozsahu 0 - 100 °C. Pro výpočet elektrického odporu  $R_T$  kovového drátu teploty  $T$  je možno použít následující vztah:

$$R_T = R_{20} [1 + \alpha (T - 20 \text{ °C})], \quad (9)$$

kde  $R_T$  [ $\Omega$ ] je elektrický odpor vodiče při teplotě  $T$  [°C],  $R_{20}$  [ $\Omega$ ] je elektrický odpor vodiče při teplotě 20 °C a  $\alpha$  [1/°C] teplotní součinitel odporu [4, 48].

Výše uvedený vztah platí jen pro kovy. Naopak elektrický odpor uhlíku, elektrolytů a polovodičů s rostoucí teplotou klesá [4, 48].

## 2.2 Elektrické vlastnosti délkových textilních útvarů

Elektrické vlastnosti délkových textilních útvarů lze hodnotit pomocí délkového odporu a hmotnostního odporu.

### 2.2.1 Délkový specifický odpor lineárních textilních útvarů $R_L$

Délkový specifický odpor lineárních textilních útvarů  $R_L$  je dán poměrem elektrického odporu mezi konci délkového útvaru a jeho délky. Základní jednotkou délkového specifického odporu  $R_L$  je [ $\Omega$ /m]. Platí tento vztah:

$$R_L = \frac{R}{l}, \quad (10)$$

kde  $R_L$  [ $\Omega$ /m] je délkový specifický odpor,  $R$  [ $\Omega$ ] je elektrický odpor a  $l$  [m] je délka vodiče.



## 2.2.2 Hmotnostní specifický odpor lineárních textilních útvarů $R_S$

Hmotnostní specifický odpor lineárních textilních útvarů  $R_S$  neboli hmotnostní rezistivita je veličina definována jako elektrický odpor  $R$  mezi konci vzorku 1 m dlouhého o hmotnosti 1 kg. Základní jednotkou hmotnostního specifického odporu  $R_S$  je  $[\Omega \text{kg/m}^2]$ . Vztah mezi hmotnostním specifickým odporem a elektrickým odporem je následující:

$$R_S = \rho d, \quad (11)$$

kde  $R_S$   $[\Omega \text{kg/m}^2]$  je hmotnostní specifický odpor,  $\rho$   $[\Omega \text{m}]$  je specifický odpor a  $d$   $[\text{kg/m}^3]$  je měrná hmotnost materiálu [50].

V praxi je vhodnější vyjádřit  $R_S$  v  $[\Omega \text{g/cm}^2]$ . Při použití těchto jednotek je elektrický odpor  $R$  libovolného vzorku vyjádřen následujícím vztahem:

$$R = R_S \frac{l}{N T} 10^5, \quad (12)$$

kde  $R$   $[\Omega]$  je elektrický odpor,  $R_S$   $[\Omega \text{g/cm}^2]$  je hmotnostní specifický odpor,  $l$   $[\text{cm}]$  je vzdálenost mezi konci vzorku,  $N$  je počet konců přízí nebo vláken a  $T$   $[\text{tex}]$  je délková hmotnost příze nebo vlákna [50].

Z důvodu širokého rozsahu hodnot elektrického odporu jsou výsledky často vyjádřeny pomocí logaritmu hmotnostního specifického odporu [50].

## 2.2.3 Měření elektrického odporu

V ideálním případě by měl být odpor měřen přesně, okamžitě a při konstantním napětí. Problémy způsobují materiály dosahující vysokých hodnot elektrického odporu, které je třeba měřit. Používá se řada různých metod [50].

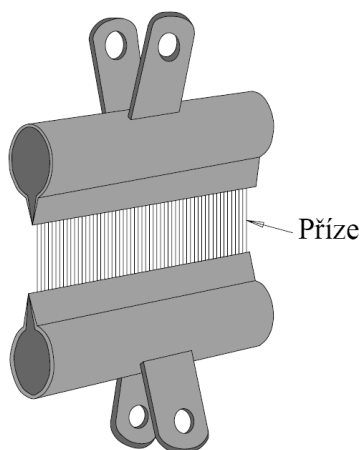
Nejjednodušší metoda měření je použití ampérmetru a voltmetru. Tohoto přístupu může být využito, pokud je elektrický odpor materiálu nízký. S citlivým galvanometrem byla použita metoda pro odpor až do  $10^9 \Omega$ , ale doba potřebná k odpočinku pro galvanometr může být nevýhodou. Metody Wheatstone-bridge mohou být také použity pro poměrně nízké odpory. Další metoda je nabíjení nebo vybíjení

kondenzátoru pomocí odporu pro měření vysokého odporu. Nevýhodou je, že test musí trvat po měřitelnou dobu a že napětí se mění v průběhu testu [50].

V posledních letech se zavedením stabilních odporů s hodnotami až do  $10^{12} \Omega$ , se metody porovnávání staly možnými pro měření vysokého odporu [50].

## 2.2.3.1 Uspořádání vzorků

Používá se různých uspořádání měřeného materiálu při testování. Odpor lze měřit podél jednoho vlákna, podél více paralelních vláken, podél konců jedné příze, podél více konců paralelních přízí (viz obr. 12), paralelně s útkem a paralelně s osnovou v tkanině, přes přízi a přes tkaninu se speciálními elektrodami, jako jsou Shirley Moisture Meter [50].



Obr. 12: Montáž příze pro měření odporu [50].

Hearly ve většině svých experimentů použil nejprve příze navinuté na polyetylen, poté byly drženy mezi svorkami lemovanými cínovou fólií 1cm od sebe. Hersh a Montgomery přilepili vlákna nebo kusy příze se stříbrným vodivým nátěrem na mosazné karty [50].

Vzorky musí být umístěny do vhodného prostředí. Jednoduchý klimatický box nebo nádoba je vyhovující pro práci při konstantní teplotě. Elektrody mohou být uzavřeny (přiloženy) v klimatizační komoře a vedení může být vyvedeno na měřicí obvod. Případně může být odpor měřen ihned po vyjmutí vzorku ze stabilizačního prostředí [50].

Zajištění konstantních vlhkostních podmínek při různých teplotách je mnohem obtížnější. Nejvíce uspokojivé se zdá být uzavření vzorku v prostoru tak malém, že žádné výrazné odpařování nemůže probíhat, a tak se udržuje konstantní obsah vlhkosti.

Hearly uzavřel vzorky mezi listy z pryže, vyvedl jemné měděné vodiče a ponořil celé do lázně parafínu [50].

Očekávalo by se, že specifický odpor vláken se bude měnit v závislosti na směru měření, ale vzhledem k experimentálním problémům nejsou dostupné žádné výsledky pro příčný specifický odpor vláken. O'Sullivan zjistil, že odpor celulózového filmu paralelně ke směru vytlačování byl 0,80 krát vyšší než kolmo ke směru vytlačování. Hearly a Jones zjistili, že poměry odporu ve třech různých elektrodových systémech se mění s materiálem a obsahem vlhkosti. Toto ukázalo, že poměry specifických odporů v různých směrech jsou různé s těmito faktory [50].

Z výsledků zveřejněných v literatuře vyplývá, že získaný specifický odpor vláken je nezávislý na rozměrech a tvaru vzorku. Jinými slovy, odpor vzorku je přímo úměrný jeho délce a nepřímo úměrný jeho ploše příčného průřezu. Tento vztah se nepotvrzuje v případě, že odpor mezi elektrodou a vzorkem se stává srovnatelný s odporem vzorku [50].

Hersh a Montgomery testovali vzorky polyamidu 6.6 v rozsahu délkové hmotnosti od 3 do 340 den (od 0,33 do 38 tex) a prokázali shodnost specifického odporu. Hearly našel jen velmi malou změnu odporu v případě, kdy byla bavlna a viskózní hedvábí vystaveno napětí až do blízkosti jejich zlomového bodu [50].

## 2.3 Ovlivňování elektrické vodivosti materiálů

### 2.3.1 Vliv vlhkosti

Vlhkost je nejdůležitějším faktorem při stanovení elektrických vlastností textilních materiálů a může způsobit změnu v rozsahu až  $10^{10}$  krát [50].

Pro většinu hygroskopických textilních vláken v oblasti relativní vlhkosti vzduchu mezi 30 a 90 % platí vztah:

$$\log R_s = -n \log M + \log K, \quad (13)$$

nebo

$$R_s M^n = K, \quad (14)$$

kde  $R_s$  [ $\Omega\text{kg/m}^2$ ] je hmotnostní specifický odpor,  $M$  [%] je obsah vlhkosti,  $n$  a  $K$  jsou konstanty [50].

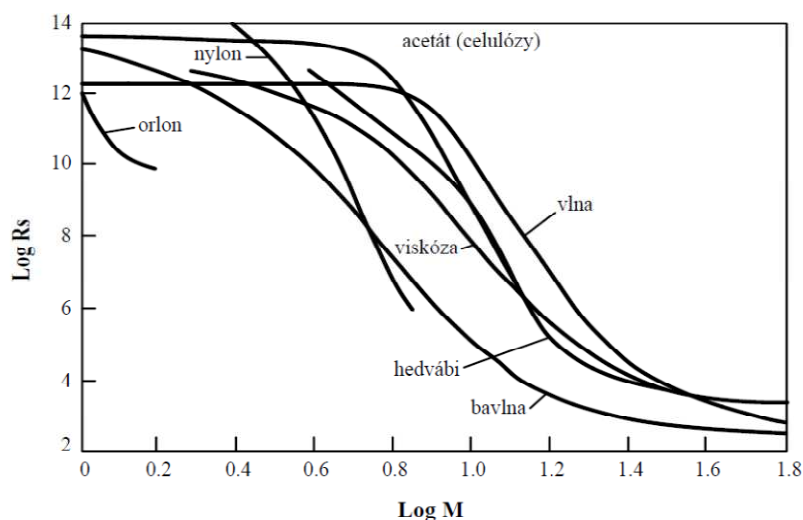
Při vykreslení závislosti v širším rozsahu vlhkosti získáme esovitý tvar závislosti mezi  $\log R_s$  a  $\log M$  (viz obr. 13). Pro nízký obsah vlhkosti (pod 3,5 % pro bavlnu, 7 % pro viskóзовé hedvábí, 4 % pro vlnu a hedvábí) platí následující vztah:

$$\log R_s = -n' M + \log K', \quad (15)$$

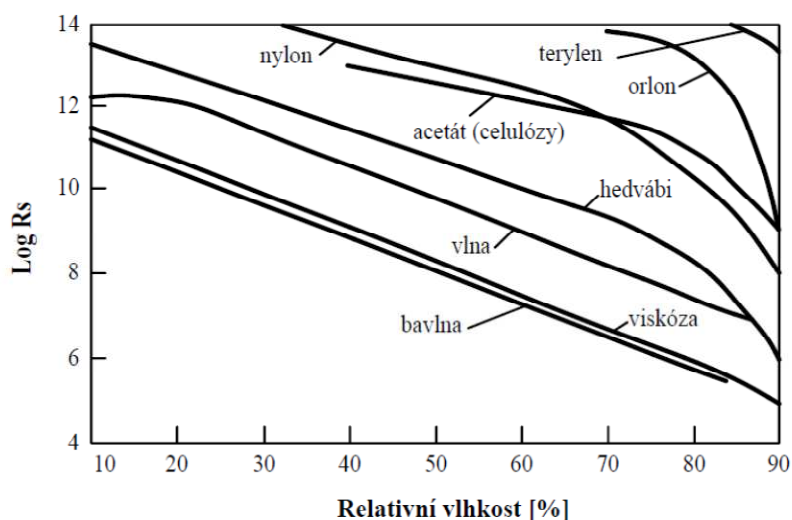
kde  $R_s$  [ $\Omega\text{kg/m}^2$ ] je hmotnostní specifický odpor,  $M$  [%] je obsah vlhkosti,  $n'$  s  $K'$  jsou konstanty [56].

## 2.3.1.1 Porovnání elektrických vlastností různých materiálů

Na obrázku 13 je zobrazena závislost  $\log R_s$  různých materiálů na obsahu vlhkosti, obrázek 14 ukazuje  $\log R_s$  v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu [50].



Obr. 13: Variace odporu vláken s obsahem vlhkosti [50].



Obr. 14: Variace odporu vláken s relativní vlhkostí vzduchu [50].

Bylo zjištěno, že proteinová vlákna mají vyšší hodnoty parametru  $n$  (ve většině případů mezi 16 a 18) a s výjimkou velmi nízkého obsahu vlhkosti, mají mnohem vyšší elektrický odpor než celulózová vlákna. Při nízkém obsahu vlhkosti je změna elektrického odporu velmi malá, pro vlnu téměř neznatelná [50].

Acetát má dosti vysoký odpor při posuzování z hlediska buď obsahu vlhkosti, nebo relativní vlhkosti vzduchu [50].

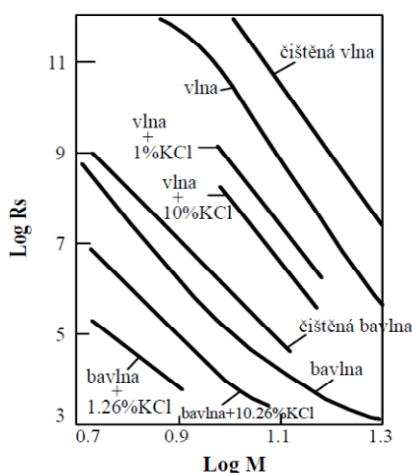
Různé vzorky polyamidu 6.6 vykazují vysokou variabilitu elektrického odporu v závislosti na historii výroby. Polyamid 6.6 má vysoký odpor při dané vlhkosti, ale když se vynese v závislosti na obsahu vlhkosti, hodnoty odporu jsou menší než u viskóзовého hedvábí. Křivky  $\log R_s$  v závislosti na  $\log M$  nevykazují lineární úseky. Sharman a kolektiv prokázali, že odpor polyamidu 6.6 vzrůstá se zvyšujícím se dlouhým poměrem [50].

Akrylová vlákna vykazují nízký odpor v daném obsahu vlhkosti a při určité relativní vlhkosti vzduchu mají dokonce elektrický odpor nízký jako vlna [50].

Vlákna jako např. polyesterová a vinylová vlákna, která absorbují málo vody, mají velmi vysoký odpor. Jejich elektrický odpor klesá přibližně desetkrát při každém 10 %-ním zvýšení relativní vlhkosti vzduchu až do relativní vlhkosti vzduchu 80 %. Při překročení této relativní vlhkosti vzduchu klesá elektrický odpor mnohem rychleji [50].

## 2.3.2 Vliv nečistot

Elektrický odpor hygroskopických vláken závisí na obsahu elektrolytů, jak to ukazují výsledky získané pro bavlnu a vlnu na obrázku 15 [50].



Obr. 15: Odpor vlny a bavlny [50].

Přidáním soli, jako je chlorid draselný, bylo docíleno snížení odporu. Při nízkém obsahu soli je vodivost přibližně proporcionální obsahu elektrolytů, ale při vysokém obsahu soli bylo prokázáno, že odpor celulózového filmu je při daném obsahu vlhkosti nezávislý na druhu nebo množství přítomné soli [50].

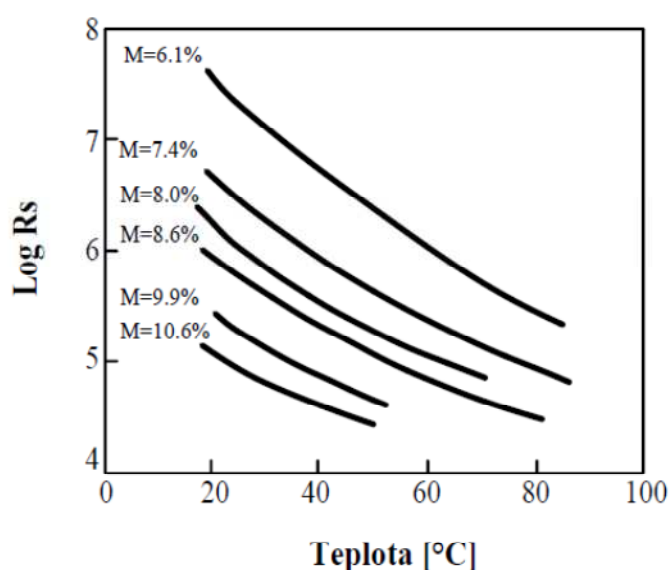
Praní v destilované vodě zvyšuje odpor a další nárůst lze pozorovat praním v roztoku síranu vápenatého. Výsledky Walkera a Quell'se ukazují nárůst odporu mezi surovou bavlnou (0,4 % sodíku a draselné soli) a pranou bavlnou [50].

Jakýmkoli zpracováním za mokra, jako je bělení nebo barvení, které změní obsah elektrolytů a bude se měnit i elektrický odpor. Odpor syntetických vláken je více ovlivněn přítomností povrchových úprav. Například Hayek a Chromey ukázali, že odpor může být snížen 10 000 krát působením pomocí vhodného antistatického prostředku [50].

Boyd a Bulgin prokázali, že přítomnost 30 % uhlíkových sazí ve vláknech viskóзовého hedvábí způsobí pokles specifického odporu při nulové relativní vlhkosti z původních  $10^{14}$  a  $10^{15} \Omega\text{cm}$  na méně než  $10^6 \Omega\text{cm}$  [50].

### 2.3.3 Vliv teploty

Obecně lze říci, že se elektrický odpor nekovových vláken snižuje se zvyšující se teplotou. Nárůst teploty o 10 °C může způsobovat až pětinasobný pokles elektrického odporu [50]. Typické hodnoty získané pro bavlnu jsou uvedeny na obrázku 16.



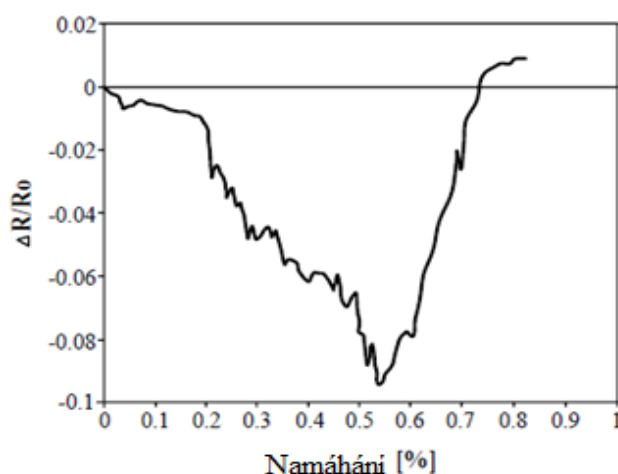
Obr. 16: Vliv teploty na elektrický odpor bavlněných vláken [50].

## 3. Elektromechanické vlastnosti textilií

Elektromechanické vlastnosti textilních struktur jsou označovány jako změny elektrických vlastností materiálů při působení mechanického namáhání (např. tahem, tlakem). Znalost elektromechanických vlastností textilních struktur je velmi důležitá pro jejich potenciální použití např. jako senzory v inteligentních strukturách či pro další aplikace. Pro tvorbu vybraných finálních produktů je žádoucí změna elektrických vlastností textilních útvarů spolu s mechanickým namáháním (např. namáhání tlakem, tahem), pro jiné aplikace je tomu právě naopak a je požadován konstantní elektrický odpor.

V současné době bylo publikováno mnoho prací zabývajících se tvorbou elektricky vodivých textilních útvarů spolu se studiem elektromechanických vlastností. Dále bude pojednáno o vybraných literárních příspěvcích zaměřených na toto téma.

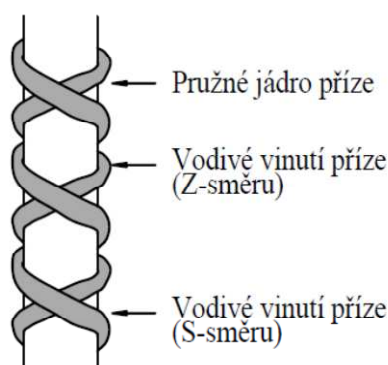
Elektromechanické vlastnosti uhlíkových vláken byly zkoumány v literárním příspěvku [51]. Bylo zjištěno, že uhlíková vlákna zalitá v epoxidové pryskyřici vykazují snížení elektrického odporu při působení tahem až o  $\sim 10\%$  do namáhání  $0,5\%$  a poté zvýšení rezistivity při dalším namáhání tahem (viz obr. 17). Počáteční pokles ve  $\Delta R/R_0$  je přičítán snižování reziduálního tlakového namáhání ve vláknech. Pozdější nárůst ve  $\Delta R/R_0$  je přisuzován poškození vlákna.



Obr. 17:  $\Delta R/R_0$  uhlíkového vlákna v epoxidové pryskyřici při namáhání [51].

Tvorba a vlastnosti elastických a zároveň elektricky vodivých přízí jsou studovány v literárním příspěvku [52]. Příze jsou vytvořeny ovnutím elastomerního jádra (viz obr. 18) pomocí měděných či stříbrných monofilamentů (drátky)

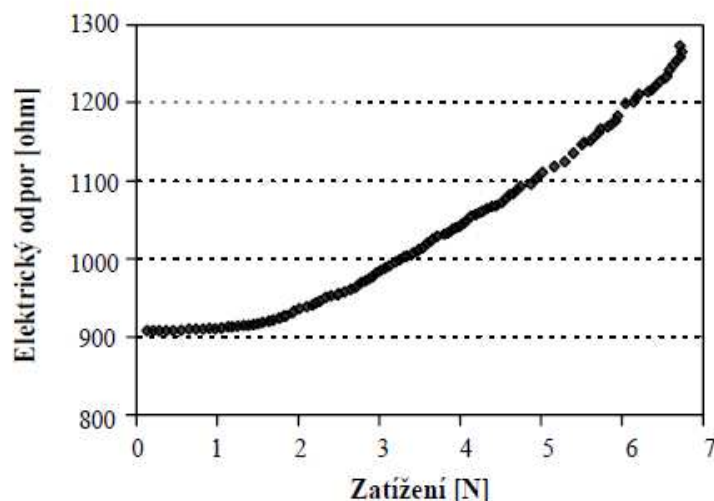
a pokovených multifilamentů. Zkoumáno bylo chování elektrických vlastností za různých situací, jako je napínání, cyklické namáhání a praní. Bylo zjištěno, že elektrický odpor přízí zůstává konstantní až do prodloužení téměř 100 %. Dále bylo zjištěno, že elektrický odpor mírně vzroste po cyklickém tahovém působení (2150 cyklů, 25 % protažení). Studován byl i vliv praní. Bylo zjištěno, že praní neovlivňuje elektrické vlastnosti přízí opatřených stříbrným ovinem (25 pracích cyklů), zatímco příze opatřené měděným či nerezovým ovinem - vykazují nárůst elektrické vodivosti po aplikaci uvedených pracích cyklech.



Obr. 18: Design el2-příze: vodivé vinutí příze je natočeno kolem jádra elastické příze v S a Z směru [52].

Příprava, tvorba a vlastnosti multifunkčních textilií na bázi senzorů jsou studovány v literárním příspěvku [53]. Textilní senzory byly vyrobeny na bázi elektricky vodivých polymerů (vlákna povrstvená PANI roztokem) a na bázi vodivých kompozitních polymerů [vlákna tvořena polymerní matricí (termoplastickým elastomerem) a výplní (uhlíkové saze)]. Je pozorován vliv tahového namáhání na elektromechanické vlastnosti. Bylo zjištěno, že elektrický odpor textilních senzorů vyrobených použitím elektricky vodivých polymerů mírně vzroste s nárůstem zatížení, až do mezí kluzu a od protažení mezí kluzu se zrychluje zvýšení elektrického odporu a deformace vodivé vrstvy (viz obr. 19). Byla také zkoumána schopnost vodivých přízí zotavit se z deformace pomocí testu zotavení. Bylo zjištěno, že elektrický odpor klesá v závislosti na použitém zatížení pro každý cyklus. Ztráta elektrického odporu byla přibližně 12 – 15% z původní hodnoty.

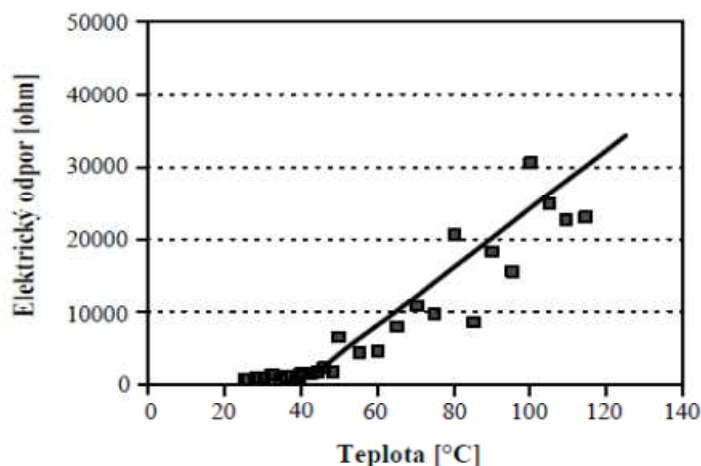




Obr. 19: Elektromechanické vlastnosti pro 5 cm při PET vodivé příze povrstvené 9 % PANI roztokem při různých zatíženích [53].

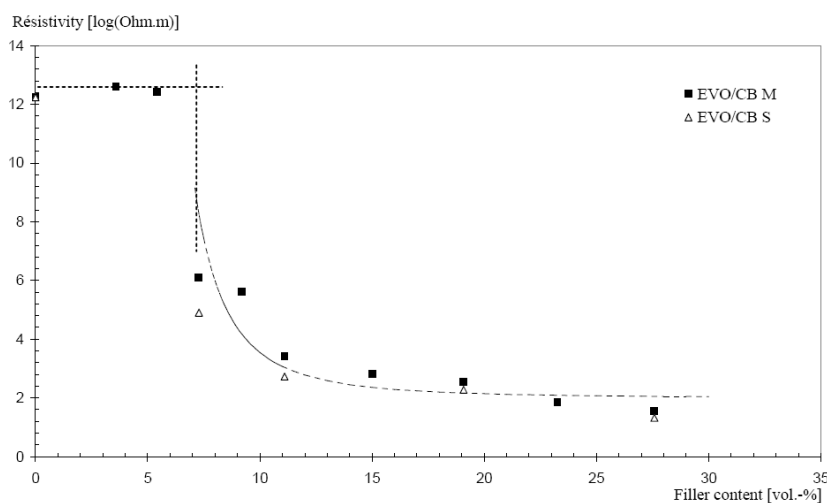
U textilních senzorů na bázi vodivých kompozitních polymerů byl studován vliv CB nanočástic a vývoj Youngova modulu pružnosti v závislosti na obsahu CB. Bylo zjištěno, že Youngův modul pružnosti kompozitů se zvyšuje s nárůstem obsahu CB a vliv obsahu CB na prodloužení odpovídající bodu zlomu kompozitních polymerů se snižuje s nárůstem obsahu výplně. Dále byly pozorovány elektrické vlastnosti bez tlaku a za působení tlaku. U elektrických vlastností bez tlaku bylo zjištěno, že elektrický odpor jako funkce obsahu výplně ukázal typické S-tvar chování ve třech oblastech (dielektrikum, přechod a vodivost). U elektrických vlastností pod tlakem bylo zjištěno, že elektrický odpor vzorků z polyamidu 6.6 se zvyšuje s mírným zvýšením prodloužení. Elektrického odporu je téměř lineární až do 10 % protažení.

Byl pozorován i vliv teploty a relativní vlhkosti na textilní senzory. Bylo zjištěno, že elektrický odpor textilních senzorů na bázi elektricky vodivých polymerů mírně zvýší až do 55 °C a poté se zvyšuje rychleji při vyšších teplotách (viz obr. 20). Dále bylo zjištěno, že elektrický odpor textilních senzorů na bázi vodivých kompozitních polymerů se zvyšuje se zvyšující teplotou a zvyšující relativní vlhkostí vzduchu.

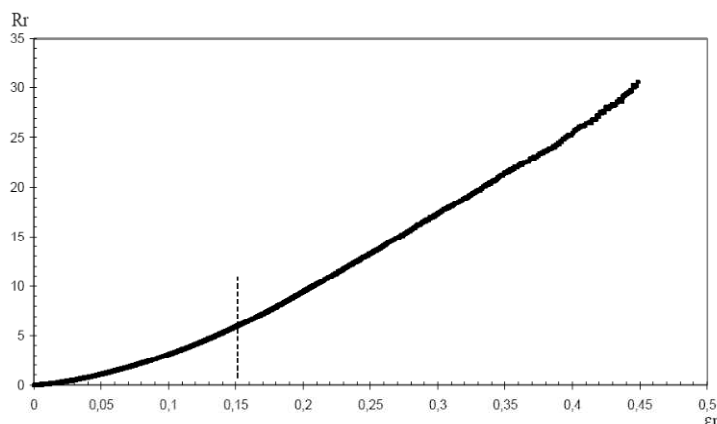


Obr. 20: Vliv teploty na elektrický odpor pro 5 cm PET vodivé příze povrstvené 10 % PANI roztokem [53].

Příprava tvorby a vlastnosti inteligentních flexibilních senzorů je zkoumáno v literárním příspěvku [54]. Bylo pozorováno chování elektromechanických vlastností inteligentních senzorů při tahovém namáhání. Použitý materiál je složen z termoplastického elastomeru (Evoprene) a nanočástic uhlíkových sazí. Sledován byl dramatický pokles elektrického odporu se stejným obsahem vodivé komponenty u dvou případů textilních senzorů na bázi vodivých kompozitních polymerů (viz obr. 21). Bylo zjištěno, že elektrický odpor vzorků z polyamidu 6.6 se prudce zvyšuje s prodloužením, které vede ke zmenšení jejich příčného průřezu. Růst elektrického odporu lze rozdělit do dvou oblastí (viz obr. 22): první oblast odpovídá napětí pod 15 %, kde reakce senzoru není lineární. V druhé oblasti pro napětí vyšší než 15 %, kde odpověď senzoru je prakticky lineární.



Obr. 21: Elektrický odpor vs. koncentrace plniva pro EVO/CB kompozity [54].



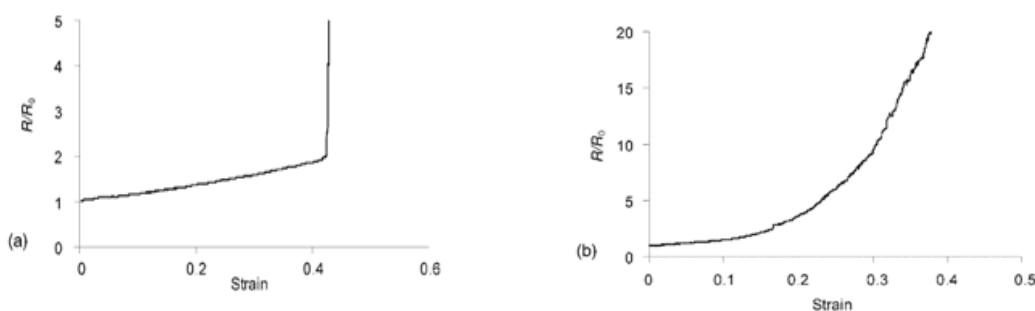
Obr. 22: Elektrický odpor vs. namáhání senzoru [54].

Elektromechanické vlastnosti vodivých vláken/příze povrstvených PPy jsou studovány v literárním příspěvku [6]. Byla zkoumána PA6 (polycaprolactom) a PU (polyuretan) vlákna povrstvená vodivým polymerem polypyrrolem (PPy). Pozorován byl vliv tahového namáhání, cyklického namáhání a rychlosti deformace na elektrické vlastnosti vodivých vláken/přízí. Pro PA6 vlákna povrstvená PPy bylo zjištěno, že se elektrický odpor zvyšuje lineárně s nárůstem napětí až do přetrhu vzorku (viz obr. 23). Pro PU vlákna povrstvená PPy byla změna elektrického odporu rozdělena do dvou fází: v počáteční fázi se elektrický odpor postupně zvyšuje a následuje druhá fáze, kdy se elektrický odpor zvýšil nelineárně a rychle (viz obr. 23).

Je patrné, že materiál určený pro sensorové aplikace by měl vykazovat určité charakteristiky jako je linearita, opakovatelnost, citlivost a další. Linearita mezi vstupním a výstupním signálem je jedním z nejdůležitějších požadavků. Citlivost senzoru na deformaci  $K$  můžeme definovat jako:

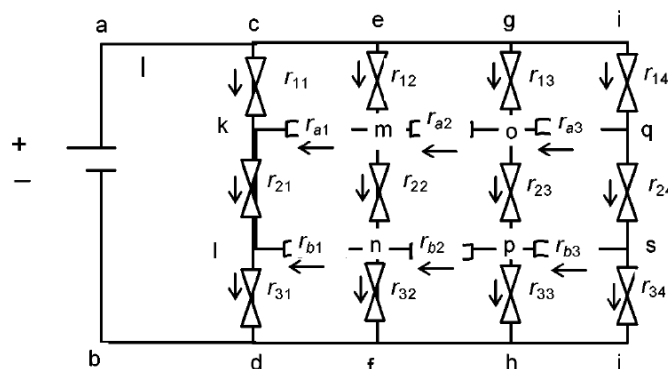
$$K (\text{citlivost}) = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon}, \quad (16)$$

kde  $\Delta R$  a  $R_0$  je změna odporu a počáteční odpor a  $\varepsilon$  je aplikovaná deformace.



Obr. 23: Typické křivky odporu proti namáhání: a) PA6 vlákna povrstvená PPy, b) PU vlákna povrstvená PPy [6].

Elektromechanické vlastnosti vodivých textilií jsou zkoumány v literárním příspěvku [6]. Sledován byl vliv materiálu a struktury textilie na elektromechanické vlastnosti (při jednoosém namáhání tahem) pro tkaninu povrstvenou vodivým polymerem PPy a pleteninu tvořenou nerez ocelovými multifilamenty. Bylo zjištěno, že elektrické vlastnosti textilií nezávisí pouze na použitém materiálu, ale také na struktuře textilie. Z elektrického pohledu může být struktura textilního materiálu popsána jako soustava odporů. Jednotlivé odpory uvažované v tzv. mřížce odporů (viz obr. 24) jsou představovány odporem použité příze na jednotku délky. Individuální uzly není možno považovat za ideální spojení známé z teorie elektrických obvodů zejména z důvodu principu výroby textilie, popř. konkrétní vazby a jejich vlivu na strukturu provázání, tzn. kontaktů přízí ve vazebných bodech.



Obr. 24: Elektrická síť zastupující segment vodivé tkaniny [6].

Celkový odpor textilie (tkaniny) v plátňové vazbě může být jednoduše vyjádřen:

$$\text{ve směru osnovy: } R_v = \frac{\lambda(1 + C_v)(N_p - 1)}{N_e}, \quad (17)$$

$$\text{ve směru útku: } R_h = \frac{\lambda(1 + C_h)(N_e - 1)}{N_p}, \quad (18)$$

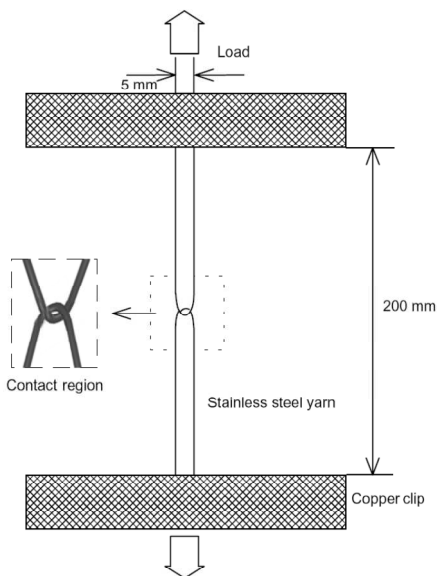
kde  $R_v$ ,  $R_h$  jsou odpovídající výsledné odpory textilní struktury měřené ve směru osnovy a útku,  $N_p$  je dostava útku a  $N_e$  je dostava osnovy,  $\lambda$  je elektrický odpor příze na jednotku délky,  $C_v$  a  $C_h$  jsou vazné vlny ve směru osnovy a útku.

Elektrické vlastnosti textilie ovlivňuje jak vlastní vodivost příze, tak kontaktní odpor ve vazných bodech. Vodivost příze je možno vypočítat pomocí Ohmova zákona, kontaktní odpor může být stanoven experimentálně. Možné odpovídající uskupení experimentu pro zjišťování kontaktního odporu v pletených strukturách je znázorněno

na obrázku 25. Z provedených experimentů je patné, že kontaktní odpor se snižuje se zvyšujícím zatížením. Vztah mezi normálovou silou dvou provléknutých přízí a kontaktním odporem může být popsán pomocí následující funkce:

$$R_c = f(N), \quad (19)$$

kde  $R_c$  je kontaktní odpor, funkce  $f$  je zjišťována experimentálně a  $N$  je normálová síla v bodech provázání.

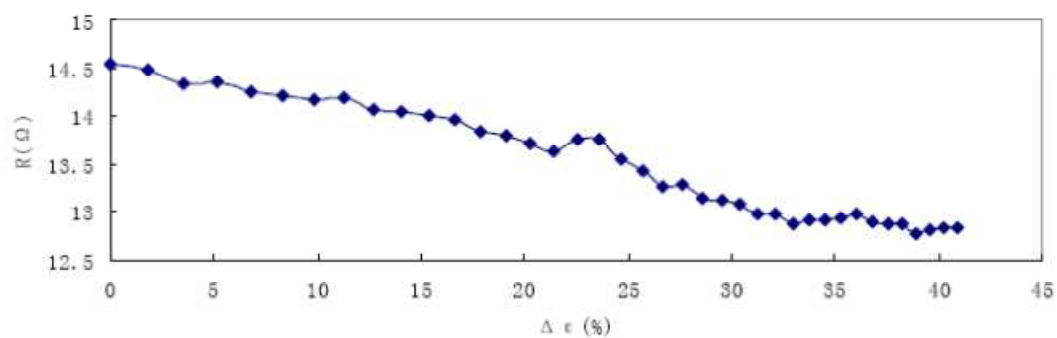


Obr. 25: Nastavení experimentu pro zjišťování kontaktního odporu [6].

Vliv kontaktního odporu vodivých přízí uspořádaných v základní struktuře pleteniny (řetízku) je také studováno v literárním příspěvku [55].

Pleteniny tvořeny z hybridních přízí obsahující staplová nerez ocelová a polyesterová vlákna jsou studovány v literárním příspěvku [56]. Pozorováno bylo elektrické chování pletenin při namáhání tahem a tlakem. Bylo zjištěno, že pleteniny jsou vhodné pro využití jako senzory (např. jako senzor dechové aktivity).

Elektromechanické vlastnosti vodivé pleteniny byly studovány v literárním příspěvku [57]. Vodivé pleteniny měly strukturu 1 x 1 žebro a tvořeny byly stříbrem pokovenými přízemi. Bylo sledováno chování elektrických vlastností při namáhání tahem a vztah mezi relativní deformací a elektrickým odporem. Bylo zjištěno, že se relativní odpor vodivých pletenin snižuje s nárůstem protažení (viz obr. 26) a elektrická vodivost úměrně roste.



Obr. 26: Změna elektrického odporu vodivých vláken potažených stříbrem s prodloužením [57].

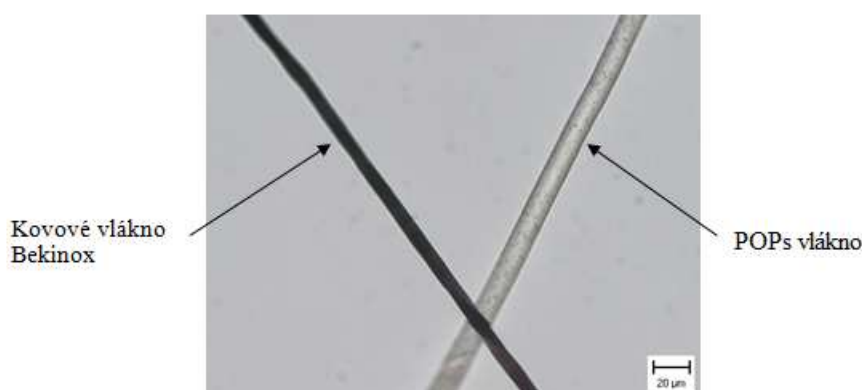
## 4. Experimentální část

V experimentální část jsou popsány studované materiály, použité měřicí přístroje, postupy měření a hodnocení elektrických, mechanických a elektromechanických vlastností. O těchto jednotlivých tématech bude pojednáno v následujících podkapitolách.

### 4.1 Použité materiály

#### 4.1.1 Analýza délkových textilních útvarů

Pro zkoumání elektrických, mechanických a elektromechanických vlastností délkových textilních útvarů byly použity dva typy přízí, které mají stejné materiálové složení, ale liší se jemností. Vzorky délkových textilních útvarů ve své struktuře obsahovaly různé procento kovových staplových vláken obchodního označení Bekinox<sup>1</sup> (1 – 20 %). Směšováním klasických vláken (POPs TREVON 2,2 dtex/ 50 mm) s vlákny kovovými (BEKINOX VS 08/050/2000 HCR, tloušťka cca 9  $\mu\text{m}$ ) bylo získáno zvýšení elektrické vodivosti přízí při zachování vlastností kladených na příze používané v textilním průmyslu. Na obrázku 27 je znázorněno porovnání průměrů použitých dvou typů vláken.



Obr. 27: Porovnání průměrů dvou typů použitých vláken.

#### Zjišťování závislosti elektrického odporu na upínací délce a obsahu vodivé komponenty

Pro měření elektrických vlastností a to především závislosti elektrického odporu na upínací délce příze a na obsahu vodivé komponenty v přízi byly použity studované

---

<sup>1</sup> Bekinox je obchodní označení kovového nerez-ocelového staplového vlákna firmy Bekaert, Belgie.

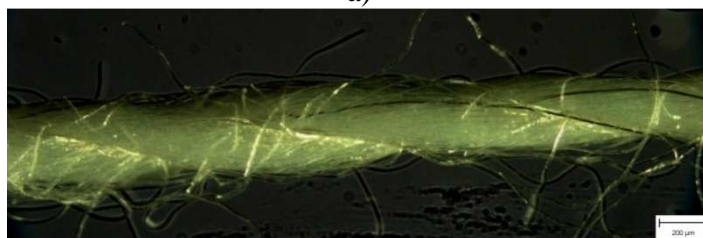
hybridní příze o jemnosti přízí 50 tex. Jemnost délkových textilních útvarů byla zjišťována gravimetricky. Složení výše zmíněných přízí o jemnosti 50 tex je uvedeno v tabulce 4. Mikroskopické snímky vybraných studovaných vzorků jsou zobrazeny na obrázku 28. Z mikroskopických snímků je viditelný obsah kovového vlákna. Dále je patrné, že v některých oblastech příze není vodivá komponenta zastoupena na povrchu.

Tab. 4: Charakteristiky studovaných délkových textilních útvarů.

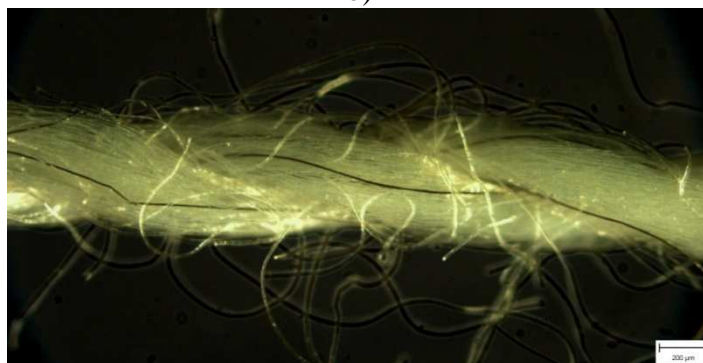
Označení příze	Materiálové složení	Jemnost délkového útvaru [tex]
Bekin 1	99 % POPs / 1 % Bekinox	50
Bekin 3	97 % POPs / 3 % Bekinox	50
Bekin 5	95 % POPs / 5 % Bekinox	50
Bekin 10	90 % POPs / 10 % Bekinox	50
Bekin 15	85 % POPs / 15 % Bekinox	50
Bekin 20	80 % POPs / 20 % Bekinox	50



a)



b)



c)

Obr. 28: Mikroskopické snímky přízí označené: a) Bekin 1, b) Bekin 3, c) Bekin 5.



## Zjišťování závislosti elektrického odporu na jemnosti příze

Pro měření elektrických vlastností a to především závislosti elektrického odporu na jemnosti příze byly použity studované hybridní příze o jemnosti přízí 25 tex, 50 tex, 100 tex a 150 tex. Příze s jemností 100 tex a 150 tex byly připraveny z hybridní příze o jemnosti 50 tex.

## Zjišťování závislosti elektrického odporu na zákrutu příze

Pro měření elektrických vlastností především závislosti elektrického odporu na zákrutu příze byly použity jednoduché hybridní příze o jemnosti 25 tex.

## Zjišťování závislosti mechanických a elektromechanických vlastností

Pro měření mechanických a elektromechanických vlastností byly použity hybridní příze o jemnosti 25 tex. Složení výše zmíněných přízí o jemnosti 25 tex je uvedeno v tabulce 5. Mikroskopické snímky studovaných vzorků jsou zobrazeny na obrázku 29.

Tab. 5: Charakteristiky studovaných délkových textilních útvarů.

Označení příze	Materiálové složení	Jemnost délkového útvaru [tex]
Bek 1	99 % POPs / 1 % Bekinox	25
Bek 3	97 % POPs / 3 % Bekinox	25
Bek 5	95 % POPs / 5 % Bekinox	25
Bek 10	90 % POPs / 10 % Bekinox	25
Bek 15	85 % POPs / 15 % Bekinox	25
Bek 20	80 % POPs / 20 % Bekinox	25



a)



b)



c)



d)

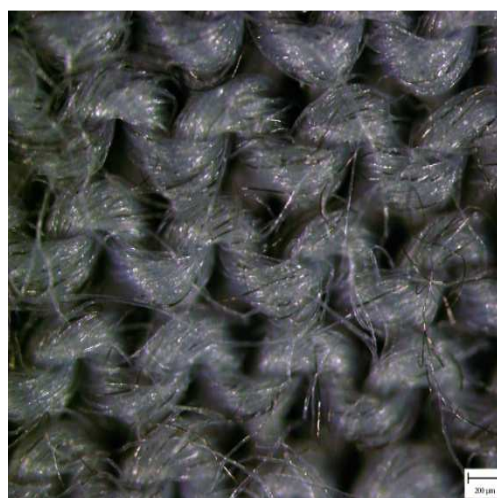
Obr. 29: Mikroskopické snímky přízí označené: a) Bek 1, b) Bek 5, c) Bek 10, d) Bek 20.

## 4.1.2 Analýza plošných textilních útvarů

Pro zkoumání elektromechanických vlastností plošných textilních útvarů byla použita pletenina. Pletenina byla vytvořena z hybridních přízí, které mají následující materiálové složení přízí: POPs TREVON (2,2 dtex, 50 mm) / kovové vlákno BEKINOX 08/050/2000 HRC a jemnost přízí byla 25 tex. Hybridní příze ve své struktuře obsahovaly 20 % kovových staplových vláken označení Bekinox. Pletenina měla následující parametry: zátažná, jednolící, hladká, plošná hmotnost 185 g/m<sup>2</sup>. Mikroskopické snímky studovaného vzorku je zobrazeno na obrázku 30.



a)



b)

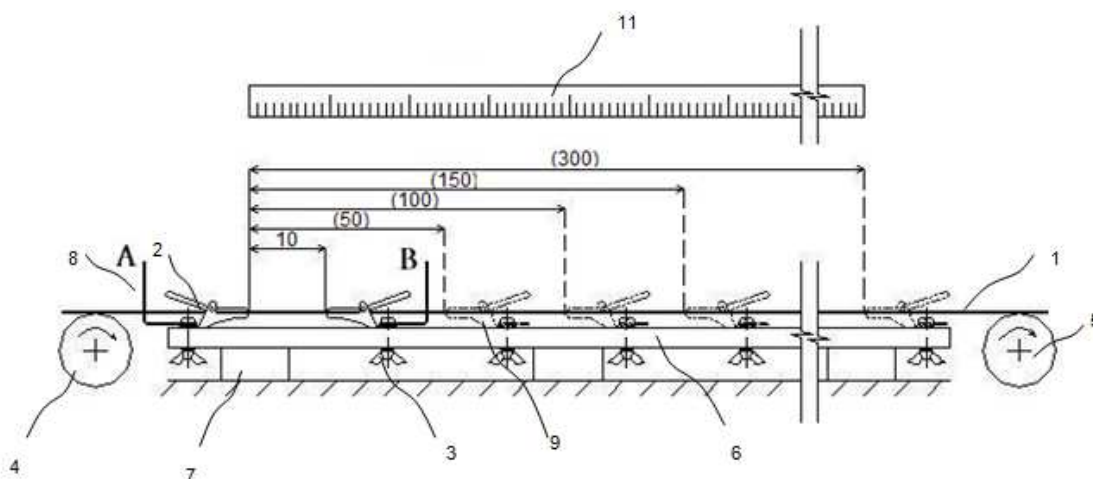
Obr. 30: Mikroskopické snímky vodivé pleteniny: a) lící strana, b) rubní strana.

## 4.2 Metodika měření a použité měřicí přístroje

### 4.2.1 Měřicí přístroje a metodika měření délkových textilních útvarů

Pro měření elektrických vlastností délkových textilních útvarů byla použita dvouvodičová metoda s proměnnou upínací délkou, která je schematicky znázorněna na obrázku 31. Měření elektrického odporu bylo prováděno při následujících klimatických podmínkách (ČSN 80 0059):  $t = 20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi_1 = 40 \pm 2 \%$ , testovací napětí 10 V bylo pro hodnoty elektrického odporu do  $10^5 \Omega$ , 100 V bylo pro vyšší resistance (ČSN EN 61340-5-2). Odběr vzorků délkových textilií byl proveden podle ČSN EN 12751 (80 0070). Takto připravené vzorky byly klimatizovány 24 hodin v klimatických podmínkách uvedených výše. Při manipulaci se vzorky nesmělo docházet k jejich znečištění, styku s pokožkou, působení chemikálií nebo jiných vnějších vlivů. Manipulace byla prováděna pomocí pinzety a rukavic.

Měřicí zařízení pro měření elektrického odporu délkových textilií bylo složeno z nosné elektricky nevodivé podložky a dvou elektrod ve tvaru svorek. Jedna z elektrod byla pevná a druhá byla posuvná na stupnici od 10 do 300 mm s krokem 25 mm. Měřený materiál byl upnut do elektrodového systému pomocí kovových svorek (materiál svorek byl volen tak, aby hodnota elektrického odporu přechodových kontaktů byla zanedbatelná vůči měřenému materiálu) a byl měřen elektrický odpor mezi elektrodami pomocí ohmmetru (typu Agilent 53131A – pro měření elektrického odporu do  $10^5 \Omega$  nebo Hewlett Packart 4339B - pro měření vyššího elektrického odporu, viz obr. 32). Postupné změny v upínací délce vzorku (10 – 300 mm) umožnily proměřit závislost elektrického odporu na upínací délce a na obsahu vodivé komponenty. Závislost elektrického odporu na upínací délce a na obsahu vodivé komponenty byla proměřena na hybridních přízích o jemnosti 50 tex. Pro jednotlivé upínací délky délkových textilií bylo nutno proměřit alespoň 20 vzorků kvůli statistickému zpracování naměřených dat. Pro odstranění vybočujících hodnot měření byl použit program QC expert. Dále bylo pracováno s průměrem souboru hodnot elektrického odporu příslušného vzorku.



Obr. 31: Schematický nákres přípravku pro měření elektrického odporu délkových textilií.

Legenda k schematickému nákresu:

- 1 ... měřený textilní materiál,
- 2 ... elektrody ve tvaru svorek, do kterých byl při měření upnut délkový textilní útvar,
- 3 ... upínání elektrod k nosné podložce bylo složeno ze šroubu, podložek a křídlové matice,
- 4 ... přivádění měřeného materiálu,
- 5 ... navíjení měřeného materiálu,
- 6 ... nosná podložka tvořená elektricky nevodivým materiálem,
- 7 ... speciální podstavec zabraňující posuv přípravku po podložce,
- 8 ... vodiče spojující místo kontaktu elektrod s měřeným materiálem a měřicím přístrojem,
- 9 ... další možné upnutí druhé elektrody – změna délky měřeného úseku,
- 10 ... ohmmetr,
- 11 ... měřítko umístěné přímo na nosné podložce.



a)



b)

Obr. 32: Fotografie ohmmetrů: a) Agilent 53131A, b) Hewlett Packart 4339B.

## Měření závislosti elektrického odporu na jemnosti příze

Pro zjištění závislosti elektrického odporu na jemnosti délkové textilie byla také použita dvou vodičová metoda, která byla popsána výše. Nejprve byly připraveny vzorky délkových textilií o jemnosti 25 tex, 50 tex, 100 tex a 150 tex. Příze s jemností 100 tex a 150 tex byly připraveny z hybridní příze o jemnosti 50 tex. Dále byla pomocí postupných změn upínací délky vzorku (10 – 300 mm) proměřena závislost elektrického odporu na jemnosti délkové textilie. Pro jednotlivé upínací délky délkových textilií bylo nutno proměřit alespoň 20 vzorků kvůli statistickému zpracování naměřených dat. Pro odstranění vybočujících hodnot měření byl použit program QC expert. Dále bylo pracováno s průměrem souboru hodnot elektrického odporu příslušného vzorku.

## Měření závislosti elektrického odporu na zákrutu příze

Pro měření závislosti elektrického odporu na zákrutu délkové textilie byl nejprve na zákrutoměru Y220B (viz obr. 33) zjištěn typ zákrutu a počet zákrutů na upínací délku podle ČSN EN ISO 2061 (80 0701). Po zjištění zákrutu následovalo přikrucování délkové textilie a tím byl zvyšován počet zákrutů na upínací délku. Zákrut byl přikrucován od 230 až do 630 zákrutů na upínací délku s krokem 133 zákrutů. Pro měření závislosti elektrického odporu na zákrutu délkové textilie byla použita dvou vodičová metoda, která byla popsána výše. Přenesení délkové textilie ze zákrutoměru k měřicímu zařízení bylo prováděno pomocí kovového držáku se zakotvenými svorkami. Závislost elektrického odporu byla proměřena na hybridních přízích o jemnosti 25 tex. Pomocí postupných změn v upínací délce vzorku (10 – 300 mm) byla proměřena závislost elektrického odporu na zákrutu délkové textilie. Pro jednotlivé upínací délky délkových textilií bylo proměřeno vždy alespoň 20 vzorků kvůli statistickému zpracování naměřených dat. Pro odstranění vybočujících hodnot měření byl použit program QC expert. Dále bylo pracováno s průměrem souboru hodnot elektrického odporu příslušného vzorku. Na závěr byl podle normy přepočítán počet zákrutů na metr z počtu zákrutů na upínací délku dle následujícího vztahu:

$$t_x = \frac{1000 x}{l}, \quad (20)$$

kde  $t_x$  je počet zákrutů na metr,  $l$  [mm] je délka zkušební vzorku před rozkroucením a  $x$  je počet zákrutů zjištěných u zkušební vzorku.



Obr. 33: Fotografie zákrutoměru Y220B.

## Měření mechanických vlastností

Pro měření mechanických vlastností (jako je pevnost, poměrná pevnost, tažnost) délkových textilií byl použit měřicí přístroj INSTRON 4411 (viz obr. 34) dle ČSN EN ISO 2062 (80 0700). Měření mechanických vlastností bylo prováděno při těchto klimatických podmínkách:  $t = 22 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $\phi_1 = 45 \pm 2 \text{ } \%$ . Odběr vzorků délkových textilií byl proveden podle ČSN EN 12751 (80 0070). Takto připravené vzorky byly klimatizovány 24 hodin v klimatických podmínkách uvedených výše. Při manipulaci se vzorky nesmělo docházet k jejich znečištění.

Měřicí zařízení pro měření mechanických vlastností délkových textilií bylo složeno ze dvou čelistí. Spodní čelist byla pevná a horní čelist byla posuvná. Měřený materiál byl upnut do čelistí a byly měřeny mechanické vlastnosti mezi čelistmi. Měření mechanických vlastností bylo prováděno při těchto stanovených parametrech: upínací délka byla 0,5 m a rychlost horní čelisti byla 250 mm/min. Pro zaznamenávání dat z jednotlivých měření byl měřicí přístroj připojen k počítači. Mechanické vlastnosti byly stanoveny pro délkové textilie o jemnosti 25 tex. Každý vzorek byl proměřen minimálně 50 krát za účelem statistického zpracování naměřených dat. Dále bylo pracováno s průměrem souboru hodnot mechanických vlastností příslušného vzorku.

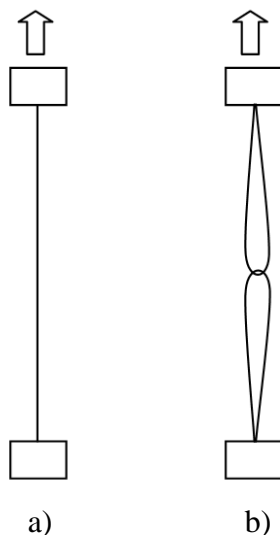


Obr. 34: Fotografie měřicího přístroje INSTRON 4411.

## Měření elektromechanických vlastností

Pro hodnocení elektromechanických vlastností délkových textilií (namáhání tahem jednoduché příze) bylo využito měřicího přístroje INSTRON 4411 dle ČSN EN ISO 2062 (80 0700) a svorek připojených k ohmmetru pro měření elektrického odporu. Měření elektromechanických vlastností bylo provedeno při následujících klimatických podmínkách:  $t = 22 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $\varphi_1 = 40 \pm 2 \text{ } \%$ . Odběr vzorků délkových textilií byl proveden podle ČSN EN 12751 (80 0070). Takto připravené vzorky byly klimatizovány 24 hodin v klimatických podmínkách uvedených výše. Při manipulaci se vzorky nesmělo docházet k jejich znečištění.

Měřicí zařízení pro měření elektromechanických vlastností délkových textilií bylo složeno ze dvou čelistí, ohmmetru (typu Agilent 53131A – pro měření elektrického odporu do  $10^5 \text{ } \Omega$ ) a dvou kovových svorek (materiál svorek byl volen tak, aby hodnota elektrického odporu přechodových kontaktů byla zanedbatelná vůči měřenému materiálu). Spodní čelist byla pevná a horní čelist byla posuvná. Měřený materiál byl upnut do čelistí, na měřenou délkovou textilii byly připnuté kovové svorky a měřen byl elektrický odpor vzorku při namáhání pomocí ohmmetru. Měření elektromechanických vlastností bylo prováděno při těchto stanovených parametrech: předpětí bylo 0,125 N, upínací délka byla 0,05 m a rychlost horní čelisti byla 40 mm/min. Pro zaznamenávání dat z jednotlivých měření byl měřicí přístroj připojen k počítači. Závislost elektromechanických vlastností byla proměřena na délkových textiliích o jemnosti 25 tex. Studovány byly dva typy uskupení vzorků (viz obr. 35). Nejprve byly proměřeny elektromechanické vlastnosti jednoduché příze namáhané tahem. Následně byla z příze připravena smyčka, jejíž konce byly upnuty v čelistech a provedené bylo měření elektrického odporu smyčky v závislosti na relativní deformaci za účelem zjištění vlivu kontaktního odporu.



Obr. 35: Zobrazení uspořádání testovaných vzorků: a) příze, b) smyčky.

## 4.2.2 Měřicí přístroje a metodika měření plošný textilních útvarů

Pro měření elektromechanických vlastností plošných textilních útvarů byla použita dvouvodičová metoda, která byla schematicky znázorněna výše. Měření elektrického odporu bylo prováděno při těchto klimatických podmínkách:  $t = 22 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi_1 = 30 \pm 2 \%$ , testovací napětí 10 V bylo pro hodnoty elektrického odporu do  $10^5 \text{ } \Omega$ , 100 V bylo pro vyšší resistance (ČSN EN 61340-5-2). Odběr vzorků délkových textilií byl proveden podle ČSN EN 12751 (80 0070). Takto připravené vzorky byly klimatizovány 24 hodin v klimatických podmínkách uvedených výše. Při manipulaci se vzorky nesmělo docházet k jejich znečištění.

Měřicí zařízení pro měření elektrického odporu délkových textilií bylo složeno z nosné elektricky nevodivé podložky a dvou elektrod ve tvaru svorek. Jedna z elektrod byla pevná a druhá byla posuvná na stupnici od 10 do 350 mm. Měřený materiál byl upnut do elektrodového systému pomocí kovových svorek (materiál svorek byl volen tak, aby hodnota elektrického odporu přechodových kontaktů byla zanedbatelná vůči měřenému materiálu) a měřen byl elektrický odpor mezi elektrodami pomocí ohmmetru (typu Agilent 53131A – pro měření elektrického odporu do  $10^5 \text{ } \Omega$ ). Závislost elektrického odporu na protažení pleteniny byla měřena ve směru řádků. Postupné změny v protažení řádků umožnily proměřit závislost elektrického odporu na protažení. Upínací délka pleteniny byla stanovena na 30 mm. Závislost elektrického odporu byla proměřena na pletenině z hybridních přízí o jemnosti 25 tex.



## 4.3 Hodnocení vlastností délkových textilních útvarů

### 4.3.1 Hodnocení elektrických vlastností

Elektrické vlastnosti přízí byly hodnoceny z hlediska jejich délkového odporu a specifického odporu s použitím vyvinutého měřicího zařízení, pomocí něhož bylo možno zaznamenávat elektrický odpor v závislosti na proměnné upínací délce. Závislost elektrického odporu byla měřena na délkových textiliích o jemnosti 50 tex. Hybridní příže s vyšší jemností byla zvolena hlavně kvůli předpokládanému nižšímu délkovému elektrickému odporu.

Bylo zjištěno, že příže obsahující různé procento staplových kovových vláken vykazovaly nelineární průběh závislosti elektrického odporu na upínací délce vzorku (viz obr. 36). Za účelem hodnocení této nelineární závislosti byl vytvořen jednoduchý mechanický model. Charakteristickým parametrem tohoto modelu je tzv. součinitel specifické rezistivity  $\alpha$ . Tento součinitel se používá pro vyjádření vlivu obsahu kovových vláken na změny vodivosti či rezistivity příže. Mechanický model je založen na velmi jednoduchém předpokladu, že míra elektrického odporu je přímo úměrná skutečné délce příže. Odpovídající rovnice má tvar:

$$\frac{dR}{dL} = \alpha L^n, \quad (21)$$

kde  $R$  [ $\Omega$ ] je elektrický odpor,  $\alpha$  [ $\Omega m^{-2}$ ] je součinitel úměrnosti (součinitel specifické rezistivity),  $n$  je faktor spojený se zeslabením elektrické vodivosti a  $L$  [m] je délka příže.

Výsledný model je získán integrací rovnice (21) od  $R_0$  do  $R(L)$  a od 0 do  $L$ . Tento model má jednoduchý tvar:

$$R = R(L) = R_0 + \frac{\alpha}{n+1} L^{n+1}. \quad (22)$$

kde  $R$  [ $\Omega$ ] je elektrický odpor,  $R(L)$  [ $\Omega$ ] je elektrický odpor na délce  $L$ ,  $R_0$  [ $\Omega$ ] je elektrický odpor na délce 0,  $\alpha$  [ $\Omega m^{-2}$ ] je součinitel úměrnosti (součinitel specifické rezistivity),  $n$  je faktor spojený se zeslabením elektrické vodivosti a  $L$  [m] je délka příže.

Elektrický odpor pro nulovou délku by měl být ve skutečnosti 0 a proto  $R_0 = 0$ . V případě ideálního vodiče platí  $n = 0$  a elektrický odpor bude lineární funkcí délky

příze. V případě  $n = 1$  bude aktuální elektrický odpor kvadratickou funkcí délky příze. V tomto případě má součinitel  $\alpha$  rozměr  $[\Omega\text{m}^{-2}]$ .

V tabulce 6 jsou uvedeny průměrné hodnoty elektrického odporu  $[\Omega]$  pro jednotlivé upínací délky  $[\text{m}]$  a hodnoty součinitele specifické rezistivity  $[\Omega\text{m}^{-2}]$ .

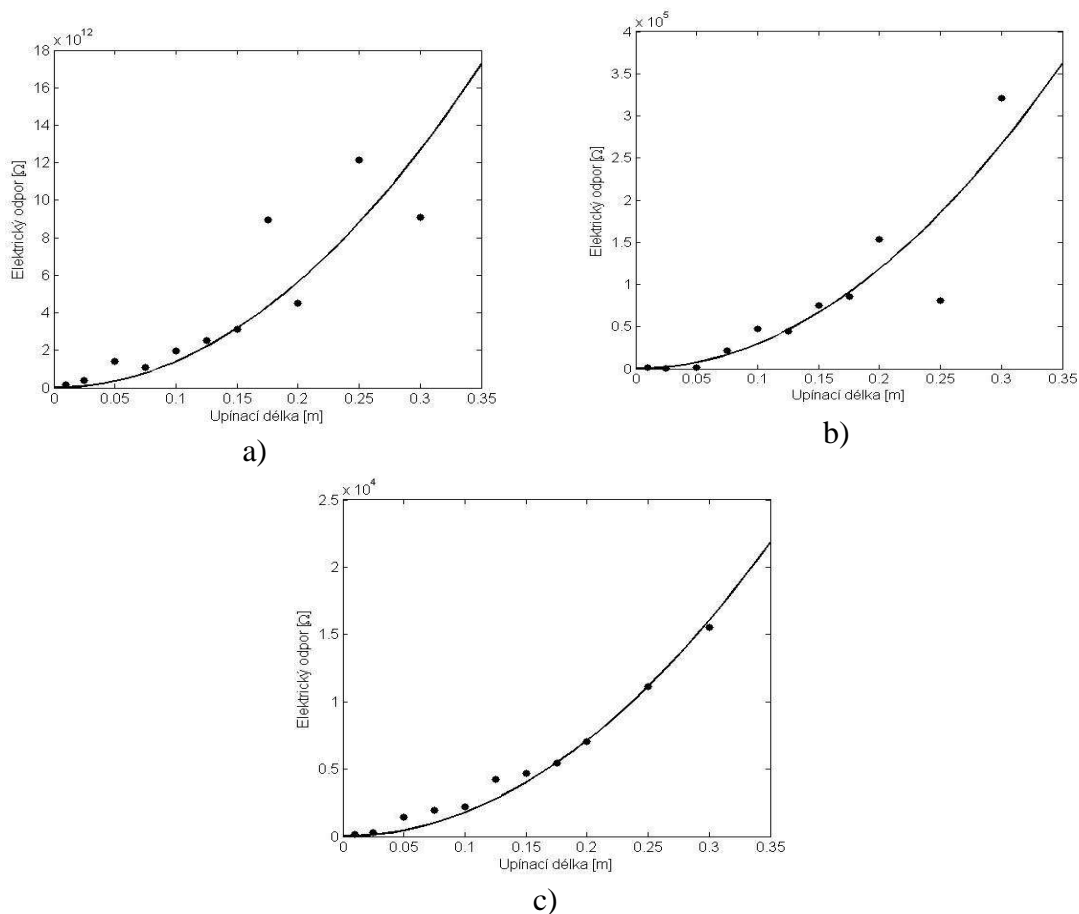
Tab. 6: Průměrné hodnoty elektrického odporu (průměru) při různých upínacích délkách a výsledná hodnota specifického odporu pro jednotlivé příze.

Označení vzorku	Bekin 1	Bekin 3	Bekin 5	Bekin 10	Bekin 15	Bekin 20
Upínací délka $[\text{m}]$	Elektrický odpor $[\Omega]$					
0,010	2,109E+12	1,501E+11	2,374E+10	1,026E+03	2,594E+02	1,727E+02
0,025	3,889E+12	3,843E+11	1,153E+11	8,674E+02	6,012E+02	3,139E+02
0,050	Neměřitelná hodnota odporu – srovnatelná s odporem vzduchu	1,396E+12	3,790E+11	1,904E+03	1,178E+03	1,426E+03
0,075		1,077E+12	1,470E+12	2,184E+04	1,347E+03	1,964E+03
0,100		1,966E+12	1,398E+12	4,750E+04	6,187E+03	2,214E+03
0,125		2,504E+12	1,972E+12	4,437E+04	2,046E+03	4,228E+03
0,150		3,135E+12	2,959E+12	7,469E+04	3,600E+03	4,707E+03
0,175		8,945E+12	3,651E+12	8,527E+04	6,076E+03	5,468E+03
0,200		4,525E+12	4,197E+12	1,532E+05	6,851E+03	7,042E+03
0,250		1,214E+13	3,492E+12	8,053E+04	9,607E+03	1,113E+04
0,300		9,102E+12	1,805E+13	3,208E+05	2,051E+04	1,551E+04
$\alpha$ $[\Omega\text{m}^{-2}]$	1,3187e+0 16	2,8148e+0 14	2,9069e+0 14	5,9123e+0 06	4,0073e+0 05	3,5633e+0 05

Závislost elektrického odporu na upínací délce příze pro vybrané vzorky přízí je zobrazena na obrázku 36, zbylé závislosti elektrického odporu na upínací délce příze jsou zobrazeny v příloze I (viz příloha I obr. 56). Tato závislost má téměř kvadratický průběh a proto byl jako vhodný zvolen kvadratický model zmíněný výše.

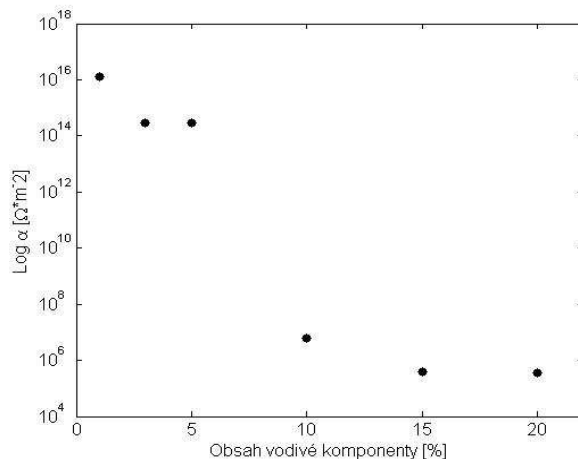
Elektrický odpor na nulové upínací délce byl uvažován 0 ( $R_0 = 0$ ) a součinitel  $\alpha$  byl stanoven pomocí aproximace funkce metodou nejmenších čtverců. Za tímto účelem byl vytvořen jednoduchý skript v programu MATLAB:

```
L=load('delka_50tex.txt');
R=load('20%_POP_50tex.txt');
plot(L,R,'k','MarkerSize',20), hold on
a=2;
Q=(L.^a);
b=R;
A=inv(Q'*Q)*Q'*b;
alfa=a.*A
x=0:0.01:0.35;
y=A.*(x.^a);
plot(x,y,'k','LineWidth',2)
xlabel('Upínací délka [m]','FontSize',10)
ylabel('Elektrický odpor [\Omega]','FontSize',10)
set(gca,'FontSize',10,'LineWidth',1)
```



Obr. 36: Závislost elektrického odporu na upínací délce příze: a) Bekin 3, b) Bekin 10, c) Bekin 20.

Na obrázku 37 je zobrazena závislost logaritmu specifické rezistivity na obsahu vodivé komponenty v přízi. Z obrázku je zřejmé, že se zvyšujícím obsahem kovového vlákna v přízi se snižuje elektrický odpor, resp. klesá specifická rezistivita. Lze pozorovat perkolační práh, který se pohybuje v oblasti mezi 5 a 10 % obsahem kovového vlákna.



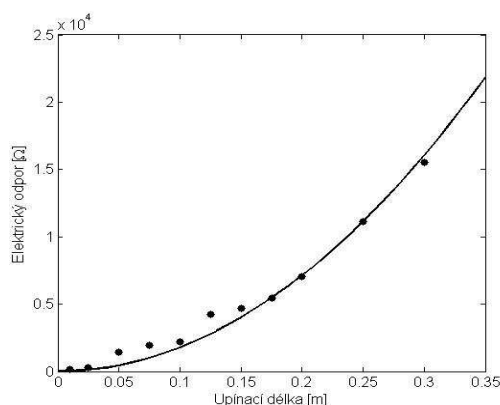
Obr. 37: Závislost logaritmu  $\alpha$  na obsahu vodivé komponenty v přízi.

## Hodnocené závislosti elektrického odporu na jemnosti příze

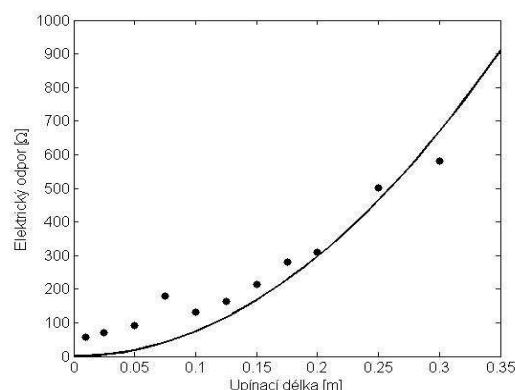
Závislost elektrického odporu na jemnosti příze byla měřena na délkových textiliích se stejným obsahem kovových vláken (20 %) a o různé jemnosti 25 tex, 50 tex, 100 tex a 150 tex. Bylo zjištěno, že příze se stejným obsahem staplových kovových vláken, ale s různou jemností příze vykazovaly nelineární průběh závislosti elektrického odporu na upínací délce vzorku. Na obrázku 38 jsou zobrazeny vybrané závislosti elektrického odporu na upínací délce a jemnosti příze, zbylé závislosti elektrického odporu na upínací délce a jemnosti příze jsou zobrazeny v příloze II (viz příloha II obr. 57). V tabulce 7 jsou uvedeny průměrné hodnoty elektrického odporu [ $\Omega$ ] pro jednotlivé upínací délky [m] a hodnoty součinitele specifické rezistivity [ $\Omega\text{m}^{-2}$ ].

Tab. 7: Průměrné hodnoty elektrického odporu (průměru) při různých upínacích délkách a výsledná hodnota specifického odporu pro jednotlivé příze.

Označení vzorku	20 % Bekinox – 25 tex	20 % Bekinox – 50 tex	20 % Bekinox – 100 tex	20 % Bekinox – 150 tex
Upínací délka [m]	Elektrický odpor [ $\Omega$ ]			
0,010	3,291E+02	1,727E+02	9,677E+01	5,841E+01
0,025	7,202E+02	3,139E+02	1,366E+02	7,083E+01
0,050	8,515E+02	1,426E+03	1,217E+02	9,089E+01
0,075	2,603E+03	1,964E+03	1,705E+02	1,807E+02
0,100	5,784E+03	2,214E+03	2,048E+02	1,323E+02
0,125	8,507E+02	4,228E+03	1,862E+02	1,639E+02
0,150	9,046E+03	4,707E+03	1,943E+02	2,153E+02
0,175	3,334E+03	5,468E+03	3,201E+02	2,796E+02
0,200	2,112E+03	7,042E+03	3,338E+02	3,091E+02
0,250	2,569E+04	1,113E+04	5,248E+02	5,018E+02
0,300	3,583E+04	1,551E+04	6,240E+02	5,802E+02
$\alpha$ [ $\Omega\text{m}^{-2}$ ]	6.8799e+005	3,5633e+005	1.5914e+004	1.4842e+004



a)

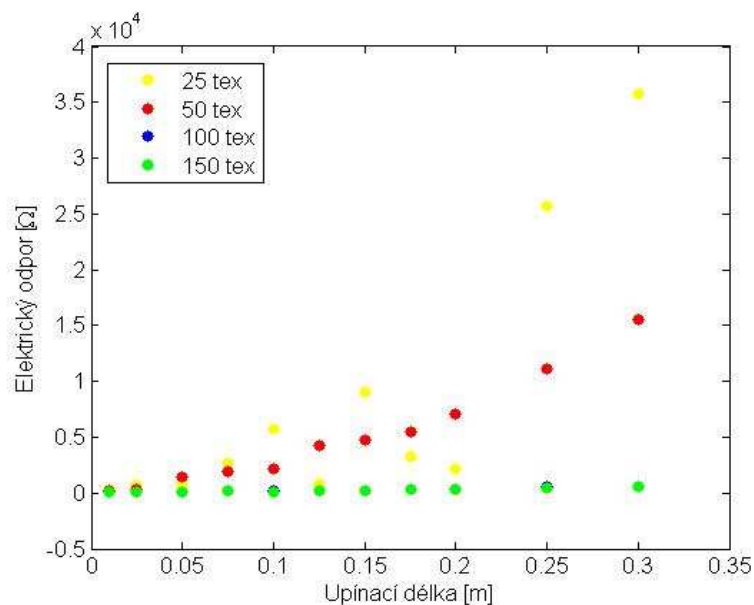


b)

Obr. 38: Závislost elektrického odporu na upínací délce a jemnosti příze:

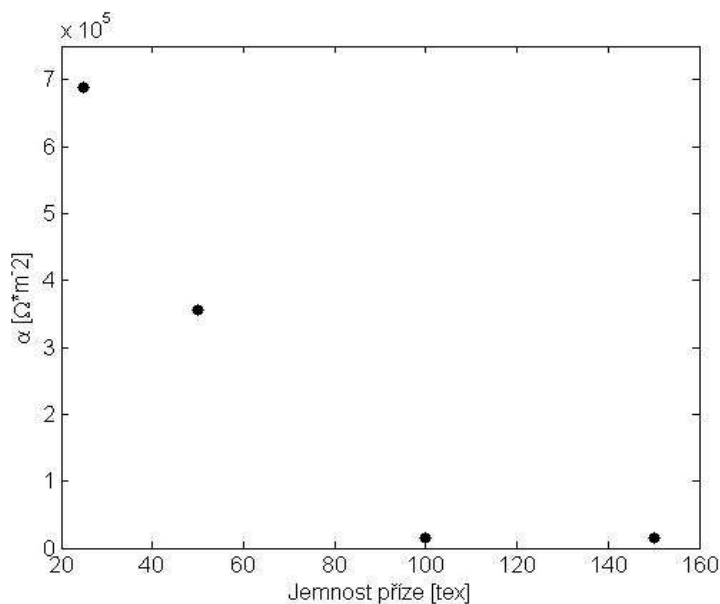
a) 20 % Bekinox – 50 tex, b) 20 % Bekinox – 150 tex.

Na obrázku 39 je zobrazeno porovnání přízí s různou jemností. Z obrázku je patrné, že se zvyšující jemností příže se snižuje elektrický odpor měřený na konkrétní upínací délce. Hodnoty měřeného elektrického odporu u příže s jemností 100 tex a 150 tex jsou téměř shodné.



Obr. 39: Závislost elektrického odporu na jemnosti příže.

Na obrázku 40 je zobrazena závislost specifické rezistivity na jemnosti příže. Z obrázku je zřejmé, že se zvyšující jemností příže klesá specifická rezistivita.



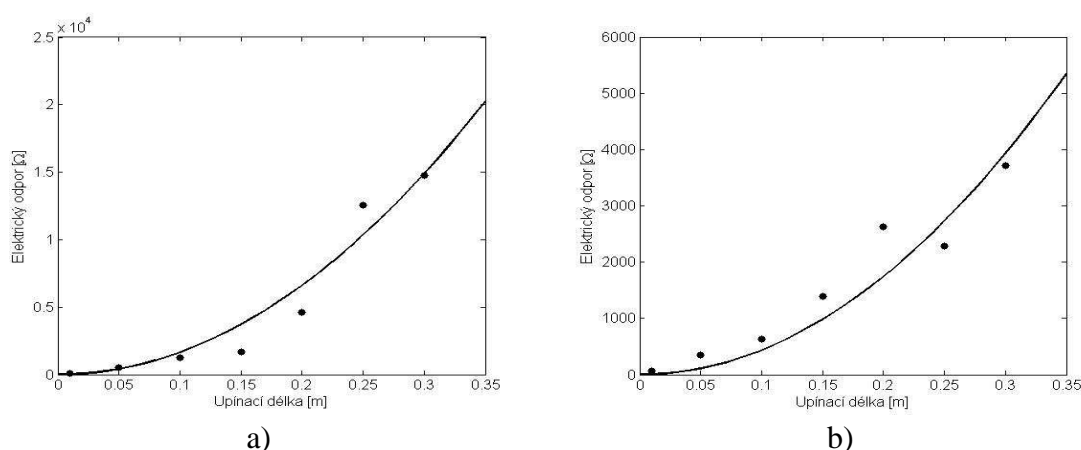
Obr. 40: Závislost α na jemnosti příže.

## Hodnocené závislosti elektrického odporu na zákrutu příze

Závislost elektrického odporu na zákrutu příze byla měřena na délkových textiliích se stejným obsahem kovových vláken (20 %) a stejnou jemností 25 tex, ale o různém zákrutu příze. Bylo zjištěno, že příze se stejným obsahem staplových kovových vláken a stejnou jemností, ale s různým zákrutem vykazovaly nelineární průběh závislosti elektrického odporu na upínací délce vzorku. Na obrázku 41 jsou zobrazeny vybrané závislosti elektrického odporu na upínací délce a zákrutu příze, zbylé závislosti elektrického odporu na upínací délce a zákrutu příze jsou zobrazeny v příloze III (viz příloha III obr. 58). V tabulce 8 jsou uvedeny průměrné hodnoty elektrického odporu [ $\Omega$ ] pro jednotlivé upínací délky [m] a hodnoty součinitele specifické rezistivity [ $\Omega\text{m}^{-2}$ ].

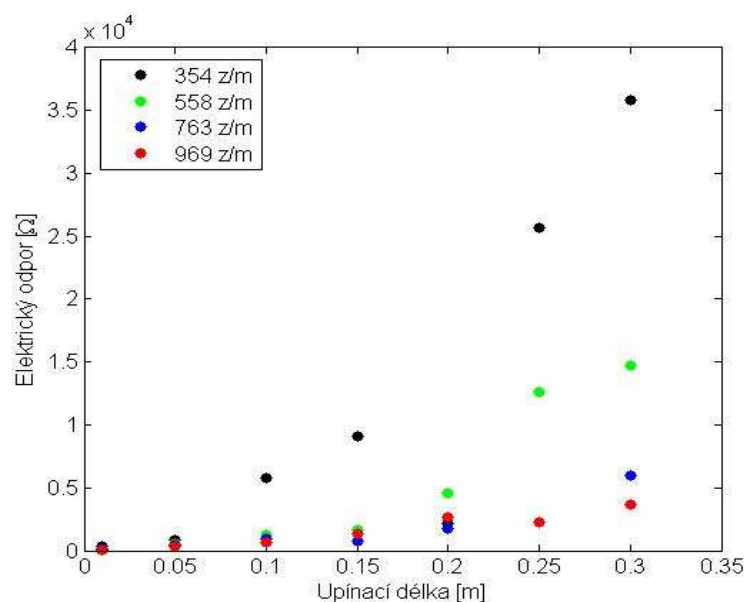
Tab. 8: Průměrné hodnoty elektrického odporu (průměru) při různých upínacích délkách a výsledná hodnota specifického odporu pro jednotlivé příze.

Zákrut příze [z/m]	354	558	763	969
Upínací délka [m]	Elektrický odpor [ $\Omega$ ]			
0,010	3,291E+02	8,044E+01	1,067E+02	7,427E+01
0,050	8,515E+02	5,279E+02	4,691E+02	3,443E+02
0,100	5,784E+03	1,263E+03	9,796E+02	6,382E+02
0,150	9,046E+03	1,694E+03	7,785E+02	1,397E+03
0,200	2,112E+03	4,618E+03	1,747E+03	2,633E+03
0,250	2,569E+04	1,259E+04	2,261E+03	2,281E+03
0,300	3,583E+04	1,474E+04	5,957E+03	3,709E+03
$\alpha$ [ $\Omega\text{m}^{-2}$ ]	7,2838e+005	3,3059e+005	1,0913e+005	8,7262e+004



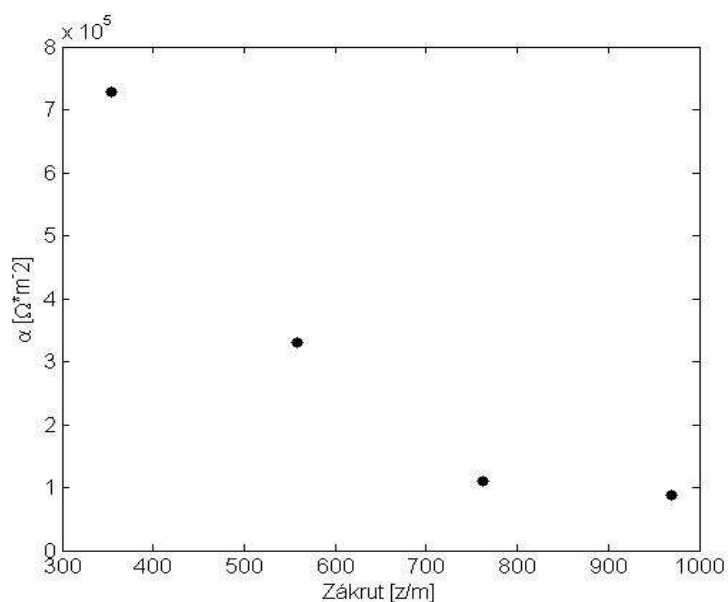
Obr. 41: Závislost elektrického odporu na upínací délce a zákrutu příze:  
a) 558 z/m – 25 tex, b) 969 z/m – 25 tex.

Na obrázku 42 je zobrazeno porovnání elektrických vlastností přízí s různým zákrutem. Z obrázku je patrné, že se zvyšujícím zákrutem příze se snižuje elektrický odpor.



Obr. 42: Závislost elektrického odporu na zákrutu příze.

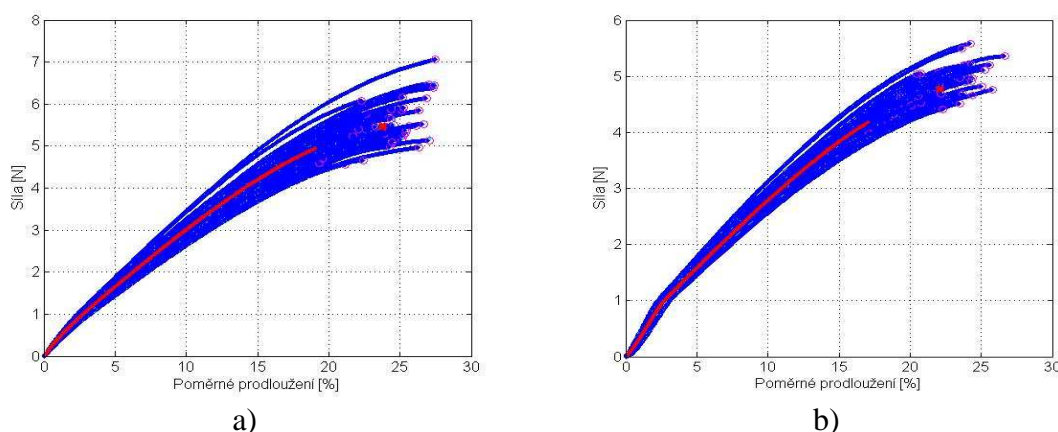
Na obrázku 43 je zobrazena závislost specifické rezistivity na zákrutu příze. Je zřejmé, že se zvyšujícím zákrutem příze klesá specifická rezistivita.



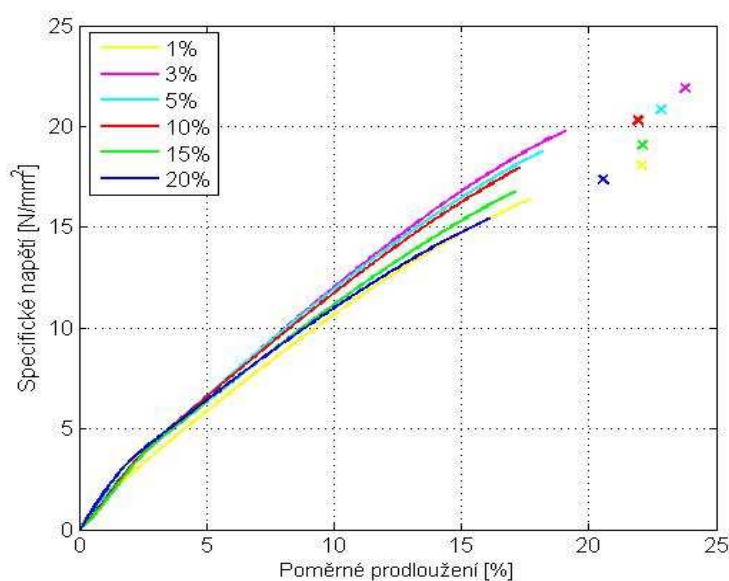
Obr. 43: Závislost  $\alpha$  na zákrutu příze.

## 4.3.2 Hodnocení mechanických vlastností

Pro hodnocení délkových textilních útvarů se zvýšeným obsahem staplových kovových vláken byly vybrány mechanické vlastnosti (pevnost, poměrná pevnost, tažnost). Mechanické vlastnosti délkových textilií byly zjišťovány na přístroji INSTRON 4411. Závislost mechanických vlastností byla proměřena na délkových textiliích o jemnosti 25 tex. Na obrázku 44 jsou zobrazeny vybrané pracovní křivky hybridních přízí Bek 3 a Bek 15, zbylé pracovní křivky jsou zobrazeny v příloze IV (viz příloha IV obr. 59). Na obrázku 45 jsou znázorněny průměrné pracovní křivky hybridních přízí s předpětím. V příloze V jsou zobrazeny průměrné pracovní křivky hybridních přízí bez předpětí (viz příloha V obr. 60), dále tam jsou zobrazeny průměrné pracovní křivky hybridních přízí s intervaly spolehlivosti (IS) bez předpětí a s předpětím (viz příloha V obr. 61, 62).



Obr. 44: Pracovní křivky hybridních přízí: a) Bek 3, b) Bek 15.



Obr. 45: Průměrné pracovní křivky hybridních přízí s předpětím.

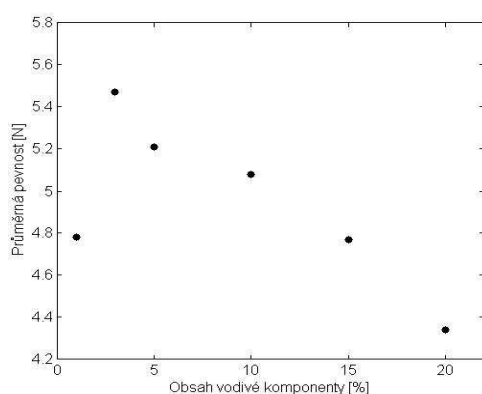


V tabulce 9 jsou uvedeny průměrné hodnoty pevnosti [N], poměrné pevnosti [cN/tex] a tažnosti [%].

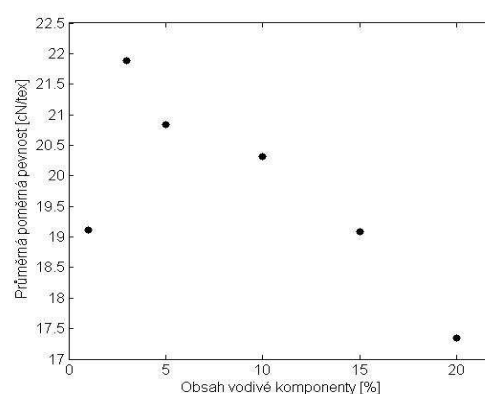
Tab. 9: Průměrné hodnoty vybraných mechanických vlastností hybridních přízí.

Označení	Pevnost [N]	Poměrná pevnost [cN/tex]	Tažnost [%]
Bek 1	4,52	18,09	22,201
Bek 3	5,47	21,88	23,934
Bek 5	5,21	20,84	22,986
Bek 10	5,08	20,31	22,050
Bek 15	4,77	19,09	22,248
Bek 20	4,34	17,35	20,692

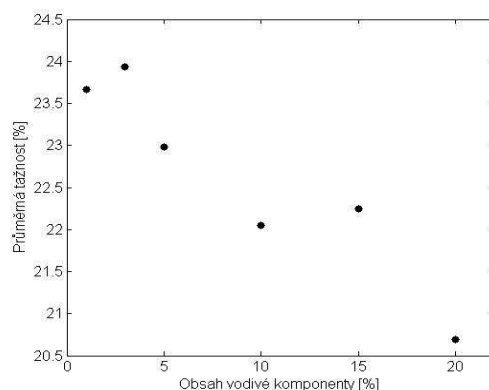
Na obrázku 46 je znázorněna závislost průměrné pevnosti na obsahu vodivé komponenty v přízi a na dalším obrázku 47 je zobrazena závislost průměrné poměrné pevnosti na obsahu vodivé komponenty v přízi. Dále na obrázku 48 je znázorněna závislost průměrné tažnosti na obsahu vodivé komponenty v přízi. Z grafického vyjádření bylo zjištěno, že pevnost i tažnost přízí klesá s rostoucím obsahem vodivé komponenty, až na přízi s 1 %-ním obsahem vodivé komponenty, u které byla nižší pevnost a tažnost než u příze s 3 %-ním obsahem vodivé komponenty. U této příze se očekávala vyšší pevnost a tažnost oproti přízi s 3 %-ním obsahem vodivé komponenty. Tento jev může být způsoben nerovnoměrným rozmístěním vodivé komponenty v hybridní přízi a při měření se do upínací délky dostalo větší množství vodivé komponenty, které způsobuje snížení pevnosti a tažnosti.



Obr. 46: Závislost průměrné pevnosti na obsahu vodivé komponenty v přízi.



Obr. 47: Závislost průměrné poměrné pevnosti na obsahu vodivé komponenty v přízi.



Obr. 48: Závislost průměrné tažnosti na obsahu vodivé komponenty v přízi.

### 4.3.3 Hodnocení elektromechanických vlastností

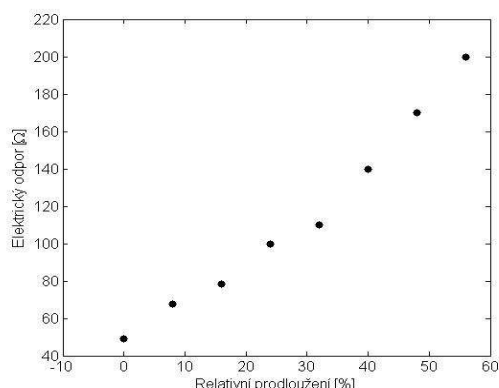
Pro hodnocení délkových textilních útvarů se zvýšeným obsahem kovových vláken byly vybrány elektromechanické vlastnosti. Elektrické vlastnosti délkových textilií (příze, smyčky) byly zjišťovány při tahovém namáhání na přístroji INSTRON 4411 prostřednictvím kovových svorek umístěných na vzorku, které byly připojeny k ohmmetru pro měření elektrického odporu. Závislost elektromechanických vlastností byla proměřena na délkových textiliích o jemnosti 25 tex. Studovány byly dvě uskupení vzorku při namáhání tahem – jednoduché příze a smyčka vytvořená jednoduchou přízí. V tabulce 10 jsou uvedeny hodnoty relativního prodloužení [%], elektrického odporu [Ω], síly [N] a poměru změny odporu a odporu počátečního  $\Delta R/R_0$  příze.

Tab. 10: Naměřené hodnoty vybraných elektromechanických vlastností příze.

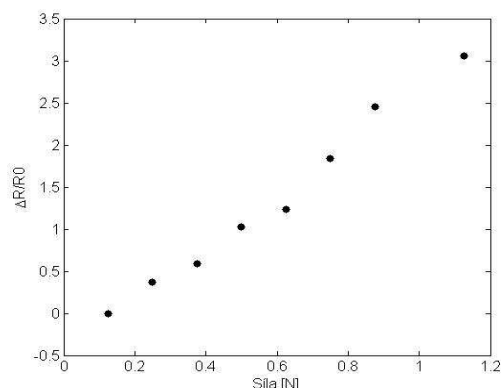
Relativní prodloužení [%]	Elektrický odpor [Ω]	Síla [N]	$\Delta R/R_0$
0	49,28	0,125	0
8	67,65	0,250	0,37
16	78,32	0,375	0,59
24	100	0,500	1,03
32	110	0,625	1,23
40	140	0,750	1,84
48	170	0,875	2,45
56	200	1,125	3,06

Na obrázku 49 je znázorněna závislost elektrického odporu příze na relativním prodloužení a na obrázku 50 je zobrazena závislost změny elektrického odporu  $\Delta R/R_0$  příze na namáhání. Z grafického vyjádření bylo zjištěno, že elektrický odpor příze se

lineárně zvyšuje s rostoucím relativním prodloužením a dále bylo zjištěno, že změna elektrického odporu  $\Delta R/R_0$  příže se také lineárně zvyšuje s rostoucím namáháním.



Obr. 49: Závislost elektrického odporu příže na relativním prodloužení.



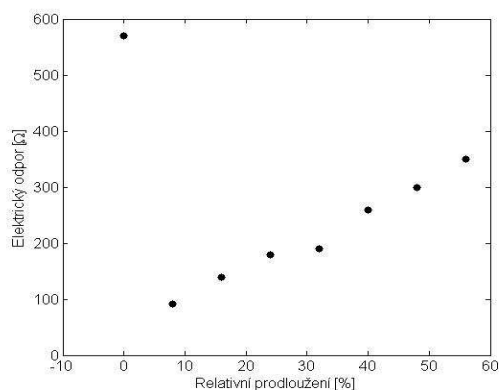
Obr. 50: Závislost změny elektrického odporu  $\Delta R/R_0$  příže na namáhání.

V tabulce 11 jsou uvedeny hodnoty relativního prodloužení [%], elektrického odporu [Ω], síly [N] a poměru změny odporu a odporu počátečního  $\Delta R/R_0$  smyčky. Toto uskupení bylo použito za účelem studia kontaktního odporu.

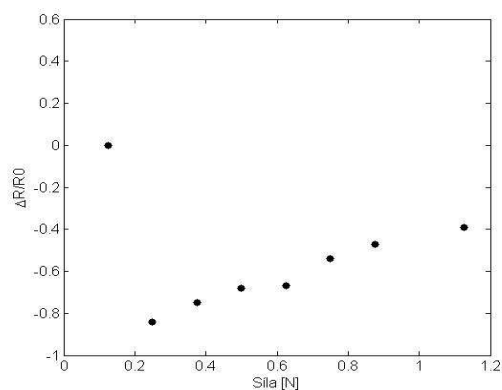
Tab. 11: Naměřené hodnoty vybraných elektromechanických vlastností smyčky.

Relativní prodloužení [%]	Elektrický odpor [Ω]	Síla [N]	$\Delta R/R_0$
0	570	0,125	0
8	92,01	0,250	-0,84
16	140	0,375	-0,75
24	180	0,500	-0,68
32	190	0,625	-0,67
40	260	0,750	-0,54
48	300	0,875	-0,47
56	350	1,125	-0,39

Na obrázku 51 je znázorněna závislost elektrického odporu smyčky na relativním prodloužení a na obrázku 52 je zobrazena závislost změny elektrického odporu  $\Delta R/R_0$  smyčky na namáhání. Z grafického vyjádření bylo zjištěno, že elektrický odpor smyčky nejprve prudce klesne a následně se lineárně zvyšuje s rostoucím relativním prodloužením. Dále bylo zjištěno, že změna elektrického odporu  $\Delta R/R_0$  smyčky, také nejprve klesá a následně se lineárně zvyšuje s rostoucím namáháním. Prudké snížení elektrického odporu příže ve smyčce při počátečním namáhání tahem je možno vysvětlit tím, že se příže v místě styku dostanou do bližšího kontaktu a sníží se kontaktní odpor, který zapříčiní pokles celkového odporu systému.



Obr. 51: Závislost elektrického odporu smyčky na relativním prodloužení.



Obr. 52: Závislost změny elektrického odporu  $\Delta R/R_0$  smyčky na namáhání.

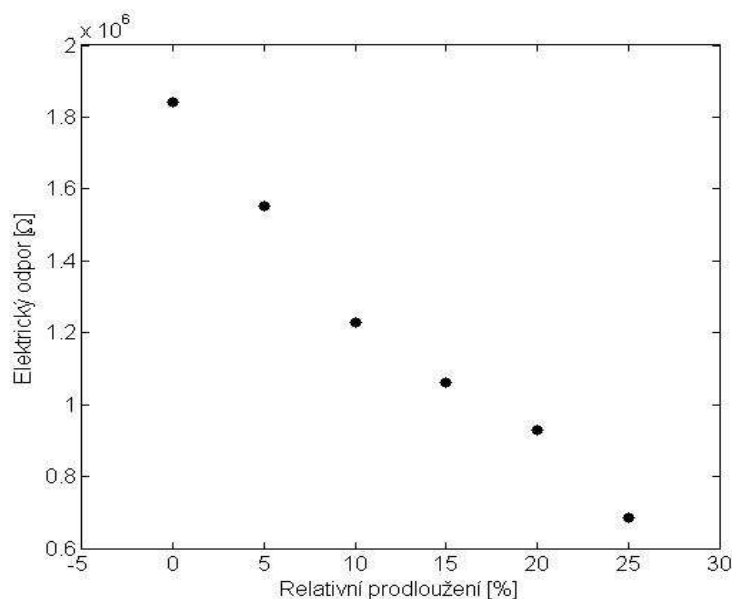
## 4.4 Hodnocení vlastností plošných textilních útvarů

Pro hodnocení plošných textilních útvarů z hybridních přízí se zvýšeným obsahem staplových kovových vláken byly vybrány elektromechanické vlastnosti. Elektromechanické vlastnosti plošných textilií (pletenin) byly zjišťovány pomocí tahového namáhání dvou vodičovou metodou pomocí ohmmetru pro měření elektrického odporu. Tahové namáhání bylo provedeno ve směru řádků. Závislost elektrického odporu byla proměřena na plošných textiliích, které byly vytvořeny z hybridních přízí s 20 % obsahem kovových vláken a o jemnosti 25 tex. V tabulce 12 jsou uvedeny hodnoty relativního prodloužení [%] a elektrického odporu [Ω].

Tab. 12: Naměřené hodnoty vybraných elektromechanických vlastností pleteniny.

Relativní prodloužení [%]	Elektrický odpor [Ω]
0	1,104E+06
5	8,960E+05
10	1,153E+06
15	6,870E+05
20	5,740E+05
25	6,010E+05

Na obrázku 53 je znázorněna závislost elektrického odporu pleteniny na prodloužení. Z grafického vyjádření bylo zjištěno, že elektrický odpor pleteniny se snižuje s rostoucím prodloužením.



Obr. 53: Závislost elektrického odporu na relativním prodloužení pleteniny.

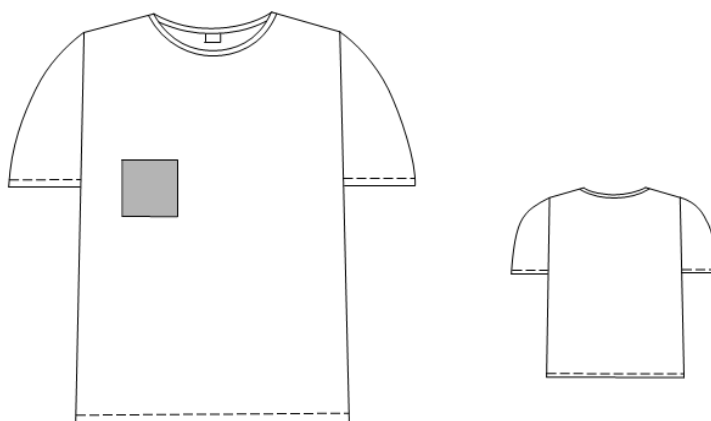
## 4.5 Aplikace studovaných přízí

Délkové textilní útvary obsahující staplová kovová vlákna, čímž je docíleno zvýšené elektrické vodivosti lze použít v mnoha různých odvětvích aplikací. Bylo zjištěno, že studované samotné délkové textilní útvary nejsou elastické. Tkaniny vytvořené z použitých přízí tudíž také nejsou elastické. Na druhou stranu, při vytvoření zátažné pleteniny ze studovaných délkových textilních útvarů je možno získat textilní útvary s určitým stupněm elasticity. Studované délkové textilní útvary mohou být použity v:

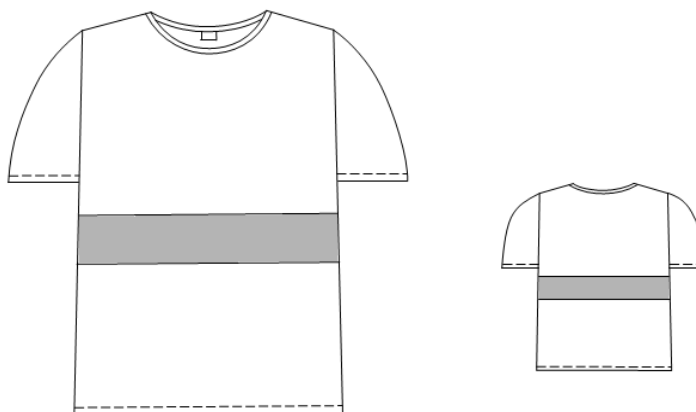
- antistatických aplikacích za účelem snížení tendence k hromadění elektrostatického náboje (např. antistatické oděvy),
- oblasti elektromagnetického stínění za účelem stínění elektromagnetického pole,
- elektronických aplikací za účelem přenosu signálu (např. jako senzory),
- oblasti ochranných oděvů ve výbušném prostředí,
- oblasti pohlcování infračerveného záření,
- oblasti mikroeletromechanických systémů,
- oblasti odporových ohřívačů.

## 4.6 Návrh funkčního výrobku

Studované délkové textilní útvary lze použít pro výrobu elektricky vodivých pletenin či tkanin. Uvedené plošné textilie mohou být použity pro výrobu oděvních výrobků, nebo použity pro technické aplikace. Výrobky mohou být tvořeny celé z vodivé pleteniny či tkaniny, nebo umístěním vodivých aplikací na oděv. Elektricky vodivá pletenina nebo tkanina může být např. použita na tvorbu náprsní kapsy umístěné na předním díle oděvu za účelem odstínění elektromagnetického záření mobilního telefonu a případnou ochranu citlivých elektronických zařízení umístěných v organismu – kardiostimulátoru (viz obr. 54). Dále může být vodivá textilie použita jako dekorativní proužek, který může být na oděvu vložen na předním i zadním díle (viz obr. 55) v mnoha různých variantách umístění pro přenos signálu, či za účelem sledování např. tepové frekvence (flexibilní pletenina). Další z možných aplikací je umístění textilie s řízenou elektrickou vodivostí do určité části oděvu za účelem využití jako odporového ohřívače.



Obr. 54: Tričko s náprsní kapsou na předním díle z elektricky vodivé pleteniny.



Obr. 55: Tričko s dekorativním proužkem na předním i zadním díle z elektricky vodivé pleteniny.

## Závěr

Cílem práce bylo určit vhodnost použití studovaných přízí pro konkrétní aplikace a navrhnout konkrétní funkční výrobek obsahující studované hybridní příze.

Byly studovány dva typy délkových textilních útvarů, které měly stejné materiálové složení přízí, ale odlišnou jemnost. Vzorky délkových textilních útvarů obsahovaly ve své struktuře různé procento kovových staplových vláken označení Bekinox (1 – 20 %). Směšováním klasických vláken (POPs) s vlákny kovovými bylo docíleno zvýšení elektrické vodivosti přízí při zachování vlastností kladených na příze používané v textilním průmyslu. Zkoumány byly elektrické, mechanické a elektromechanické vlastností délkových i plošných textilních útvarů.

Měření elektrických vlastností délkových textilních útvarů bylo provedeno pomocí dvouvodičové metody s proměnnou upínací délkou. Pro měření závislosti elektrického odporu na upínací délce příze a na obsahu vodivé komponenty v přízi byly použity hybridní příze o jemnosti 50 tex. Elektrické vlastnosti přízí byly hodnoceny z hlediska jejich délkového odporu a specifického odporu. Bylo zjištěno, že příze obsahující různé procento staplových kovových vláken vykazovaly nelineární průběh závislosti elektrického odporu na upínací délce vzorku. Za účelem hodnocení této nelineární závislosti byl vytvořen jednoduchý mechanický model. Charakteristickým parametrem tohoto modelu je tzv. součinitel specifické rezistivity  $\alpha$ . Bylo zjištěno, že se zvyšujícím obsahem kovového vlákna v přízi se snižuje elektrický odpor, resp. klesá specifická rezistivita. Byl pozorován perkolační práh, který se pohybuje v oblasti mezi 5 a 10 % obsahem kovového vlákna.

Závislost elektrického odporu na jemnosti příze byla měřena na délkových textiliích se stejným obsahem kovových vláken (20 %), ale o různé jemnosti 25 tex, 50 tex, 100 tex a 150 tex. Bylo zjištěno, že se zvyšující jemností příze se snižuje elektrický odpor, resp. klesá specifická rezistivita.

Závislost elektrického odporu na zákrutu příze byla měřena na délkových textiliích se stejným obsahem kovových vláken (20 %) a stejné jemnosti příze 25 tex, ale o různém zákrutu příze. Bylo zjištěno, že se zvyšujícím zákrutem příze se snižuje elektrický odpor, resp. klesá specifická rezistivita.

Pro měření mechanických vlastností délkových textilií bylo použito tahové namáhání na měřicím přístroji INSTRON 4411. Závislost mechanických vlastností byla proměřena na délkových textiliích o jemnosti 25 tex. Bylo zjištěno, že pevnost i tažnost

přízi klesá s rostoucím obsahem vodivé komponenty. Výjimku tvoří příze s 1 %-ním obsahem vodivé komponenty, která vykazuje nižší pevnost a tažnost než u příze s 3 %-ním obsahem vodivé komponenty. Tento jev může být způsoben nerovnoměrným rozmístěním vodivé komponenty v přízi při směšování a při měření se do upínací délky dostalo větší množství vodivé komponenty, které způsobuje snížení pevnosti a tažnosti.

Pro měření elektromechanických vlastností délkových textilií bylo použito namáhání tahem na měřicím přístroji INSTRON 4411. Pomocí kovových svorek připojených k ohmmetru byl hodnocen elektrický odpor délkového textilního útvaru při tahovém namáhání. Závislost elektromechanických vlastností byla proměřena na délkových textiliích o jemnosti 25 tex. Bylo zjištěno, že elektrický odpor příze se lineárně zvyšuje s rostoucím relativním prodloužením. Dále bylo upozorováno, že změna elektrického odporu  $\Delta R/R_0$  příze se také lineárně zvyšuje s rostoucím namáháním. Bylo zjištěno, že elektrický odpor smyčky (kontaktní odpor) při namáhání tahem nejprve klesá, což je způsobeno vyšším kontaktem dvou přízí a následně se lineárně zvyšuje s rostoucím relativním prodloužením, kdy dochází k deformaci samotné příze. Totožné chování je možno pozorovat u změny elektrického odporu  $\Delta R/R_0$  smyčky.

Pro zkoumání elektromechanických vlastností plošných textilních útvarů byla použita pletenina. Pletenina byla vytvořena z hybridních přízí, které měly materiálové složení POPs / 20 % kovových staplových vláken označení BEKINOX a jemnost přízí byla 25 tex. Pletenina byla zátažná, jednolící, hladká a o plošné hmotnosti 185 g/m<sup>2</sup>. Měření elektromechanických vlastností plošných textilních útvarů bylo provedeno pomocí dvou vodičové metody. Bylo zjištěno, že elektrický odpor pleteniny se snižují s rostoucím prodloužením.

Na závěr práce jsou zmíněny konkrétní aplikace, pro které by bylo možno studované příze využít (např. v antistatických aplikacích, oblasti elektromagnetického stínění, elektronických aplikací, oblasti ochranných oděvů ve výbušném prostředí, oblasti odporových ohříváčů, atd.) a návrh funkčních výrobků. Elektricky vodivá pletenina nebo tkanina může být použita např. na tvorbu náprsní kapsy za účelem odstínění elektromagnetického záření mobilního telefonu a ochranu citlivých elektronických zařízení umístěných v organismu. Dále může být vodivá textilie použita jako dekorativní proužek pro přenos signálu, či za účelem sledování např. tepové frekvence (flexibilní pletenina) a za účelem využití jako odporového ohříváče.



## Literatura

- [1] ORTH, M, POST, E.R. Smart Fabric, or Washable Computing. *In Digest of Papers of the First IEEE International Symposium on Wearable Computers*. Massachusetts: Cambridge, 1997. s. 167-168.
- [2] REDSTROM, M, REDSTROM, J, MAZE, R. *IT + Textiles*. Helsinki: IT Press, 2005. ISBN 951-826-793-6.
- [3] COTTET, D., et al. Electrical Characteriation of Textile Transmission Lines. *IEEE Transactions on Advanced Packing*. 2003, vol. 26, no. 2, s. 182-190.
- [4] MILITKÝ, J. *Textilní vlákna: klasická a speciální*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2002. 238 s. ISBN 80-7083-644-X.
- [5] SKOTHEIM, T.A, ELSENBAUMER, R.L., REYNOLDS, J.R. *Handbook of Conducting Polymers*. New York: CRC Press, 2007. ISBN 1-4200-4360-9. Electrically conducting textiles, s. 993-1013.
- [6] XUE, P., TAO, X., LEUNG, M., ZHANG, H. *Wearable electronics and photonics: Electromechanical properties of conductive fibres, yarns and fabrics*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2005. ISBN 1 85573 605 5.
- [7] MAC, T, HOUIS, S, GRIES, T. Metal fibers. *Technical Textiles*. 2004, vol. 47, no. 1, s. 11-24.
- [8] HARLIN, A., FERENETS, M. *Intelligent textiles and clothing: Introduction to conductive materials*. London: Woodhead publishing, 2006. ISBN 1845690052.
- [9] BEKAERT FIBRE TECHNOLOGIES, [www.bekaert.com](http://www.bekaert.com).
- [10] KRCMA, R. *Manual of nonwovens*. Manchester: The Textile Treade Press, 1971. 325 s.
- [11] ELECTRISOLA FEINDRAHT AG, [www.textile-wire.com](http://www.textile-wire.com).
- [12] SEN, A.K. *Coated textiles: Principles and applications*. USA: Technomic publishing company, 2001. ISBN 1-58716-023-4. Methods of metal coating, s. 193-201.
- [13] SMITH, W.C. Metallized Fabrics: Techniques and Applications. *Journal of Coated Fabrics*. 1988, vol. 17, s. 242-253.
- [14] MARGOLIS, J.M. *Conductive Polymers and Plastics*. New York: Chapman and Hall, 1989. 180 s. ISBN 0-412-01431-9.
- [15] MEZZO, L. The INTELTEX project: application of carbon nano Tubes in polymers for sensing fibers. *In Nonwoven Research Academy: Conference Papaers and Presentations*. Chemnitz, Germany: EDANA, 2008.
- [16] FOULGER, S.H., QUINN, J.M., TRIAL, T.T., *United States Patent*. US6569937
- [17] CAMPAGNE, Ch., et al. Smart and multifunctional nonwoven textiles. *In Nonwoven Research Academy: Conference Papaers and Presentations*. Chemnitz, Germany: EDANA, 2008.
- [18] HUANG, J. Carbon Black Filled Conducting Polymers and Polymer Blends. *Adv. Polym. Technology*. 2002, no. 21, s. 299.
- [19] BALBERG, I. Tunneling and Nonuniersal Conductivity in Composite materials. *Phys. Rev. Lett*. 1987, vol. 59, no. 12, s. 1305.
- [20] SICHEL, E.K., et al. Electrical Propertioes of Carbon-Polymer Composites. *J. Electron. Mater.* 1982, vol. 11, no. 4, s. 699.
- [21] NELVIG, A, BENGT, H. Melt spinning of conductive textile fibers. *The Nordic Tex Journal*. 2008, s. 94.
- [22] WANG, G., et al. Conducting MWNT/poly(vinyl acetate) composite nanofibres by electrospinning. *Nanotechnology*. 2006, vol. 17, no. 1, s. 5829-5835.

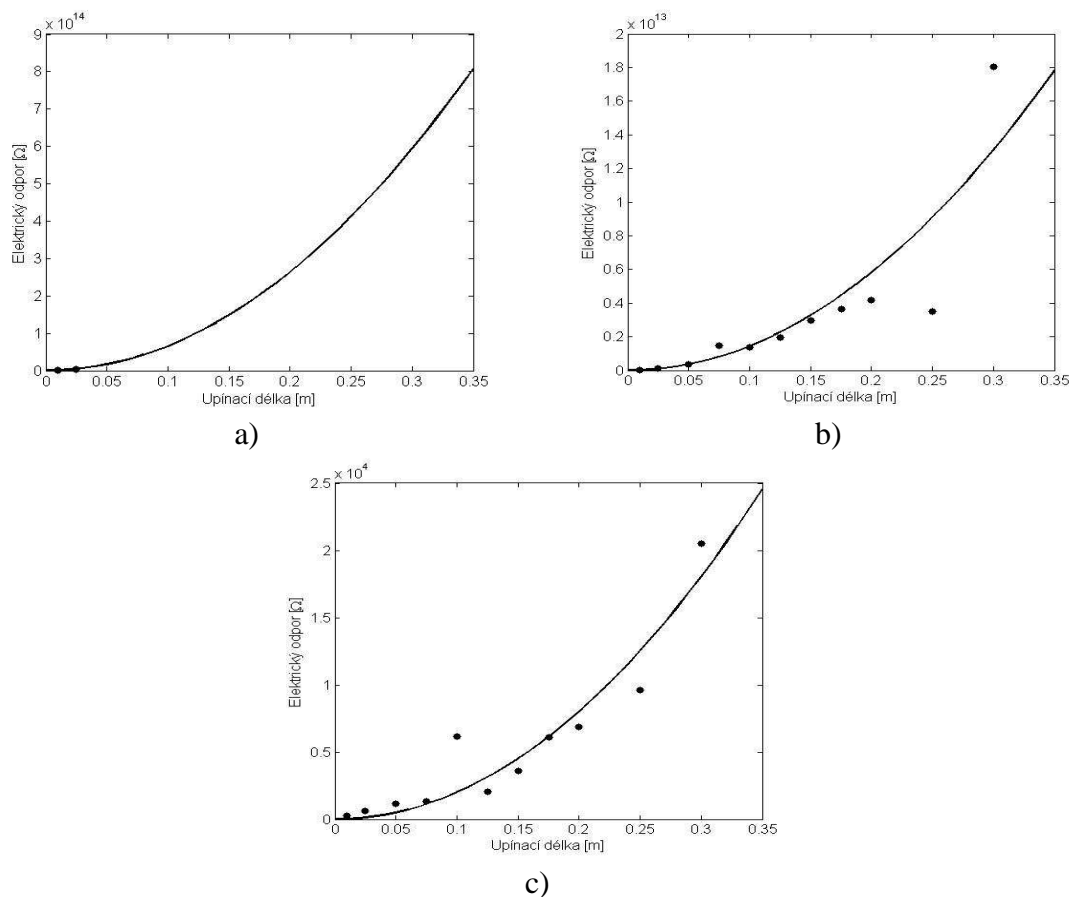
- [23] SAITO, R, DRESSELHAUS, G, DRESSELHAUS, M.S. *Physical Properties of Carbon Nanotubes*. London: Imperial College Press, 1998. 253 s. ISBN 1-86094-093-5.
- [24] IJIMA, S, ICHIHASHI, T. Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter. *NATURE*. 1993, vol. 363, no. 1, s. 603-605.
- [25] THESS, A., et al. Crystalline Ropes of Metallic Carbon Nanotubes. *SCIENCE*. 1996, vol. 273, no. 2, s. 483-487.
- [26] BERBER, S, KWON, Y.K, TOMANEK, D. Unusually High Thermal Conductivity of Carbon Nanotubes. *Physical Review Letters*. 2000, vol. 84, no. 20, s. 4613-4616.
- [27] GUANGHUA, G, CAGIN, T, GODDARD, W.A. Energetics, structure, mechanical and vibrational properties of single-walled carbon nanotubes. *Nanotechnology*. 1998, vol. 9, no. 1, s. 184-191.
- [28] CHRONAKIS, I.S. Novel nanocomposite and nanoceramics based on polymer nanofibers using electrospinning process - A review. *Journal of Material Processing Technology*. 2005, vol. 167, no. 1, s. 283-293.
- [29] ZHU, W.H, et al. Direct Synthesis of Long Single-Walled Carbon Nanotube Strands. *SCIENCE*. 2002, vol. 296, no. 3, s. 884-886.
- [30] SUNDARAY, B., et al. Electrical conductivity of a single electrospun fiber of poly(methyl methacrylate) and multiwalled carbon nanotube nanocomposite. *Applied Physics Letters*. 2006, vol. 88.
- [31] BHATTACHARYA, S.K. *Metal-filled polymers: Properties and applications*. New York: MARCEL DEKKER, 1986. 331 s.
- [32] AUSSAWASATHIEN, D. *Electrospun conductive nanofiber-based materials and their characterizations: Effects of fiber characteristics on properties and application*. [s.l.], 2006. 227 s. Dissertation.
- [33] HOUIS, S, SCHREIBER, F, GRIES, T. *Fibre-Table according to P.-A. Koch: Bicomponent Fibres*. Aachen, Germany: Shaker, 2008. ISBN 978-3-8322-7037-7.
- [34] HANCOCK, J.G., BAKER, R.E, *European Patent*. EP1735486.
- [35] SHIRAKAWA, W. *United States Patent*. US 2009/0226721 A1.
- [36] MORGAN, P. *Carbon fibers and their composites*. USA: CRC Press, 2005. 1133 s. ISBN 0-8247-0983-7.
- [37] DONNET, J.B, et al. *Carbon fibers*. New York: Marcel Dekker, 1998. 567 s. ISBN 0-8247-0172-0.
- [38] ŠAFÁŘOVÁ, Veronika; GRÉGR, Jan. Electrical Conductivity Measurement of Fibers and Yarns. In *7th International Conference Textile Science 2010*. Liberec: 2010. ISBN 978-80-7372-638-6.
- [39] QI, B., MATTES, B.R., *United States Patent*. US7463040.
- [40] NOBEL FOUNDATION. *The Nobel Prize in Chemistry, 2000: Conductive polymers* [online]. c2009 [cit. 2009-10-18]. Dostupný z WWW: <[http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/chemistry/laureates/2000/chemadv.pdf](http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2000/chemadv.pdf)>.
- [41] NORRIS, I.D, MATTES, B.R. *Conjugated Polymers: processing and applications*. FL: CRC Press, 2007. ISBN 1-4200-4360-9. Conducting Polymer Fiber Production and Applications, s. 2-1-3-1.
- [42] WAN, M. *Conducting Polymers with Micro or Nanometer Structure*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2008. 292 s. ISBN 978-3-540-69323-9.
- [43] Ing. Pavol Tarábek, CSc.; Mgr. Petra Červinková a kolektiv *Odmaturuj z fyziky*. DIDAKTIS, Brno, 2006. ISBN 80-7358-058-6
- [44] VLČEK, J. *Základy elektrotechniky*. Praha: Jiří Vlček, 2006. 247 s.

- [45] Elektřina [online]. Dostupná na WWW: <<http://www.cez.cz>> [cit. 2012-02-13].
- [46] Elektrický odpor [online]. Dostupný na WWW: <<http://www.zsvolyne.cz>> [cit. 2012-02-13].
- [47] Fyzika [online]. Dostupná na WWW: <<http://fyzika.jreichl.com>> [cit. 2012-02-13].
- [48] KOŠKOVÁ, B. *Struktura a vlastnosti vláken*. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní, 1989. 316 s. ISBN 80-7083-018-2.
- [49] Měrná elektrická vodivost [online]. Dostupná na WWW: <<http://wiki.unas.cz>> [cit. 2012-02-13].
- [50] MORTON, W. E., HEARLY, J. W. S. *Physical Properties Of Textile Fibres: Electrical Resistance*. London: Woodhead Publishing, 2008. ISBN 1845692209.
- [51] WANG, X., CHUNG, D.D.L. *Electromechanical behavior of carbon fiber: Carbon*. Vol. 35, Iss. 5, 1997, p. 706-709 Xiaojun Wang, D.D.L. Chung
- [52] SCHWARZ, A., KAZANI, I., CUNY, L., et al. *Materials and Design: Electro-conductive and elastic hybrid yarns – The effects of stretching, cyclic straining and washing on their electro-conductive properties*. Vol. 32, Iss. 8-9, 2011, p. 4247-4256.
- [53] COCHRANE, C., KIM, B., KONCAR, V. *Intelligent textiles and clothing: Multipurpose textile-based sensors*. London: Woodhead publishing, 2006. ISBN 1845690052.
- [54] COCHRANE, C., KONCAR, V., LEWANDOWSKI, M., DUFOUR, C. *Sensors: Design and Development of a Flexible Strain Sensor for Textile Structures Based on a Conductive Polymer Composite*. Vol. 7, 2007, p. 473 - 492. ISSN 1424-82220.
- [55] LI LI, AU WAI MAN, LI Yi, WAN KAM MAN, WAN SAI HO, WONG KWOK SHING. *Electromechanical Analysis of Conductive Yarn Knitted in Plain Knitting Stitch under Unidirectional Extension*. Hong Kong: TBIS 2008.
- [56] EHRMANN, A., HEIMLICH, F., BRÜCKEN, A., WEBER, M. O. *Conductive Knitted Fabrics as Textile sensors. Conference: AUTEX 2011*. France: Mulhouse, 2011.
- [57] LI, L., YANG, K., SONG, G., ZHANG, L., GUO, J. *Modern Applied Science: Research and Application of the Property of Conductive Knitted Fabrics*. Vol. 3, No. 11, China: 2009.

## Seznam příloh

### Příloha I

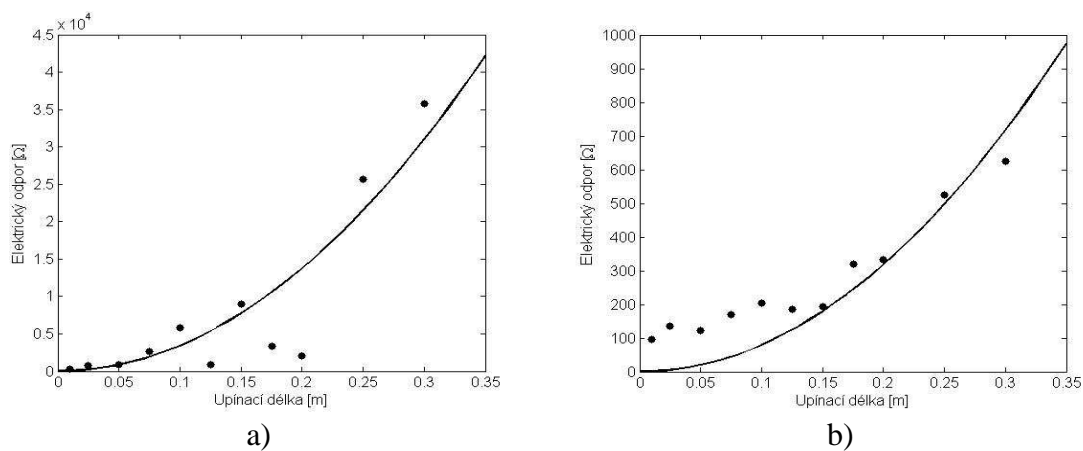
Závislost elektrického odporu na upínací délce příze.



Obr. 56: Závislost elektrického odporu na upínací délce příze: a) Bekin 1, b) Bekin 5, c) Bekin 15.

## Příloha II

Závislost elektrického odporu na upínací délce a jemnosti příze.

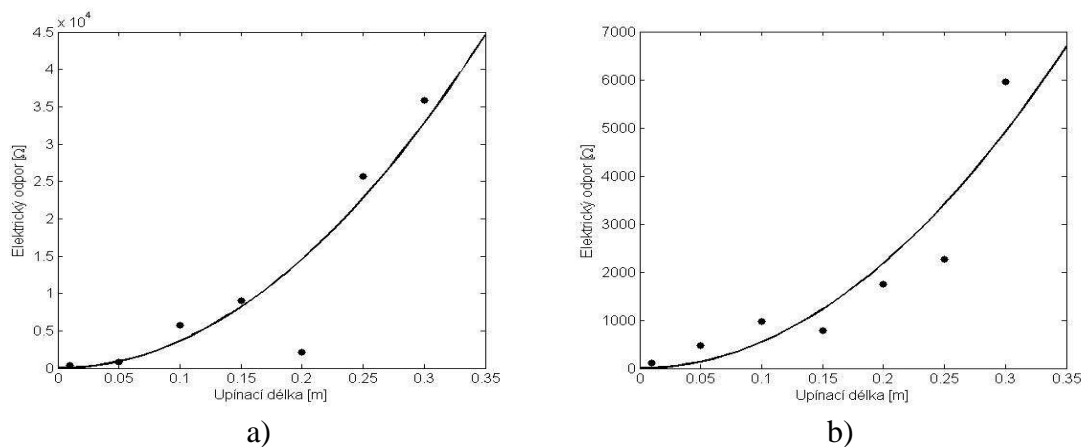


Obr. 57: Závislost elektrického odporu na upínací délce a jemnosti příze:

a) 20 % Bekinox – 25 tex, b) 20 % Bekinox – 100 tex,

## Příloha III

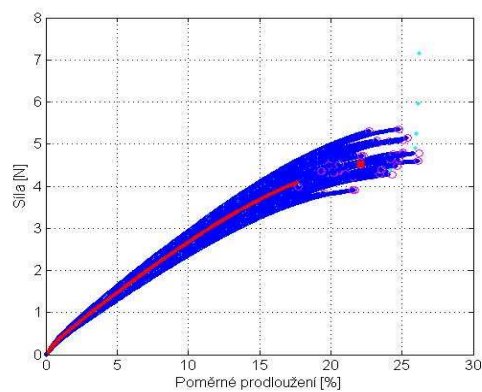
Závislost elektrického odporu na upínací délce a zákrutu příze



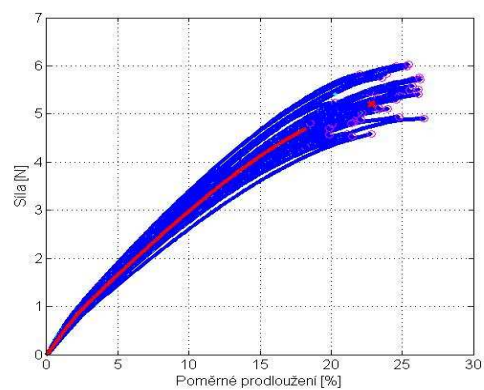
Obr. 58: Závislost elektrického odporu na upínací délce a zákrutu příze: a) 354 z/m – 25 tex, b) 763 z/m – 25 tex.

## Příloha IV

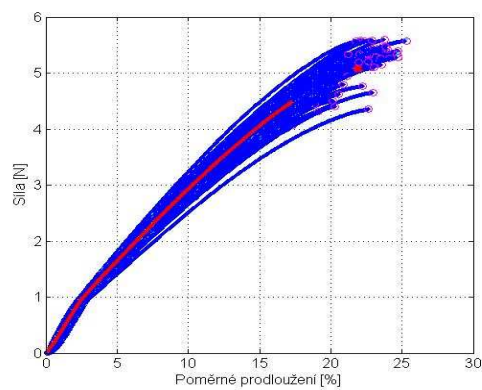
Pracovní křivky hybridních přízí.



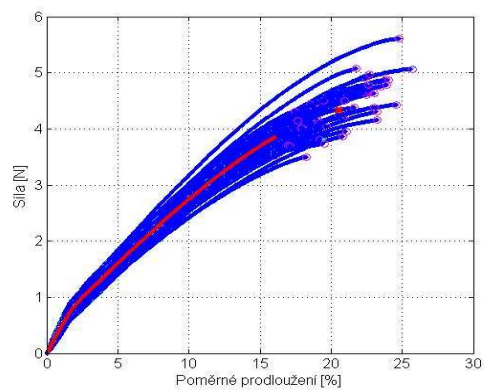
a)



b)



c)

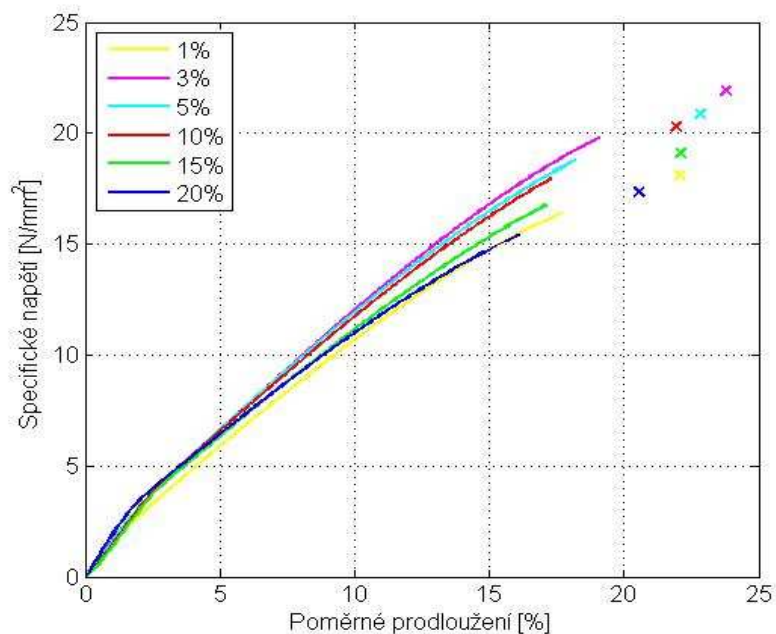


d)

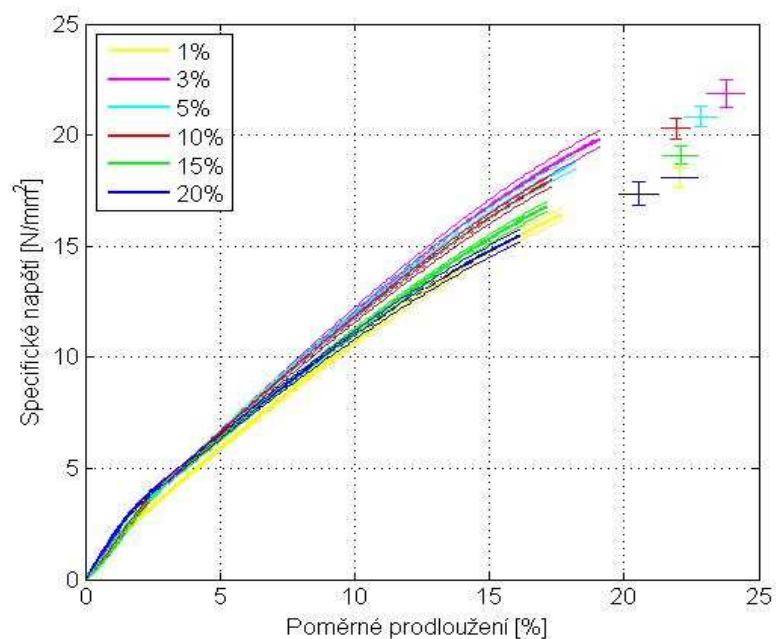
Obr. 59: Pracovní křivky hybridních přízí: a) Bek 1, b) Bek 5, c) Bek 10, d) Bek 20.

## Příloha V

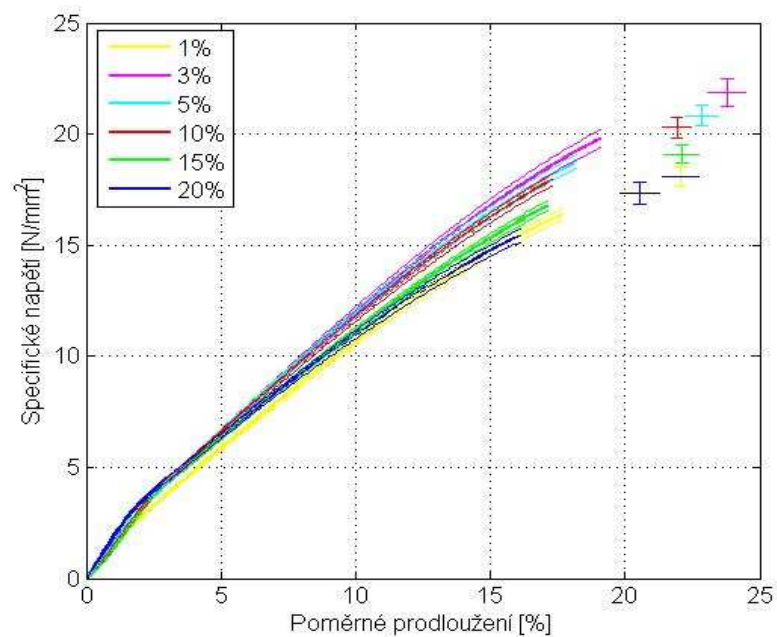
Průměrné pracovní křivky hybridních přízí bez předpětí. Průměrné pracovní křivky hybridních přízí s IS a bez předpětí. Průměrné pracovní křivky hybridních přízí s IS a s předpětím.



Obr. 60: Průměrné pracovní křivky hybridních přízí bez předpětí.



Obr. 61: Průměrné pracovní křivky hybridních přízí s IS a bez předpětí.



Obr. 62: Průměrné pracovní křivky hybridních přízí s IS a s předpětím.